



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ & ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΓΕΩΧΩΡΙΚΕΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Διπλωματική Εργασία

Χρήστος Κοντοστάθης

Υπεύθυνοι Καθηγητές: Λ. Γραμματικόπουλος

Ε. Πέτσα

"Αυτόματος Εντοπισμός Κτιρίων σε Τρισδιάστατα Νέφη Σημείων"

Αθήνα, Ιούνιος 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT	9
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	11
1.1. Εισαγωγή.....	11
1.2. Τεχνικές που αναπτύχθηκαν τα πρώτα χρόνια.....	12
1.3. Μια διαφορετική προσέγγιση σε Lidar δεδομένα	16
1.4. Εξαγωγή κτιρίων από MMS δεδομένα με συνδυασμό μεθόδων.....	22
1.5. Εντοπισμός κτιρίων με τον αλγόριθμο Ransac.....	25
2. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ.....	33
2.1. Βασικές αρχές.	33
2.2. Ανασκόπηση μεθόδων.	35
2.3. Τεχνικές με βιβλιοθήκες ανοιχτών δεδομένων.....	41
2.4. Τεχνική κατάτμησης φωτογραμμετρικού Νέφους.	43
3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΤΑ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ.....	48
3.1. Περιοχές μελέτης - Δεδομένα	48
3.2. Ταξινόμηση με το λογισμικό Arcgis 10.5.....	49
3.3. Ταξινόμηση με το AGISOFT.....	58
3.4. Αξιολόγηση και παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα της ταξινόμησης	66
4. ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ MAPPLE - POLYFIT.....	74
4.1. Εισαγωγή στη μεθοδολογία	74
4.2. Μοντελοποίηση ανά κτίριο.....	83
4.3. Ταυτόχρονη μοντελοποίηση περισσότερων κτιρίων.....	91
4.4. Αξιολόγηση Μοντελοποίησης κτιρίων.....	98
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Μεθοδολογία του Awrangjeb (2013)	15
Εικόνα 1.2: Αρχή εξαγωγής στον αλγόριθμο Alpha Shapes.	17
Εικόνα 1.3: Εντοπισμός σημείων - ορίων με AlphaShapes.	18
Εικόνα 1.4: Αποτελέσματα εντοπισμού κτιρίων με Alpha Shapes.	19
Εικόνα 1.5: Ο αλγόριθμος «Pipe».....	20
Εικόνα 1.6: Ο αλγόριθμος «Circumcircle».	21
Εικόνα 1.7: Παράδειγμα αλγορίθμου k - means.....	24
Εικόνα 1. 8: Στάδια ανακατασκευής γραμμών α) Περιοχή Ενδιαφέροντος β) Αραιό νέφος γ) Hough δ) K-Means, Ransac.	24
Εικόνα 1. 9: Ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό των επιπέδων.	28
Εικόνα 1.10: Ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό των κτιρίων.	29
Εικόνα 1.11: Δημιουργούμενα και ψηφιοποιημένα Shapefiles.....	30
Εικόνα 1. 12: Εντοπισμένες Επιφάνειες και Κτίρια.	30
Εικόνα 2.1: Απλά και Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (Goodfellow, 2016).	35
Εικόνα 2.2: Μεθοδολογία μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης (Goodfellow, 2016).....	36
Εικόνα 2.3:Σύγκριση K Means με ταξινόμηση σε σφαίρες (Thomas, 2018).....	38
Εικόνα 2.4: Τα πρωτογενή δεδομένα (Becker, 2017).	38
Εικόνα 2.5: Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά μόνο (Becker, 2017).	39
Εικόνα 2.6: : Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χρώμα (Becker, 2017).	39
Εικόνα 2.7: Ταξινόμηση με superpoints και superedges. (Landrieu, Simonovsky, 2018)	40
Εικόνα 2.8: Αποτελέσματα ταξινόμησης με το δίκτυο Mask R-CNN (Baririle, 2019).	40
Εικόνα 2.9: Open 3D - Λειτουργίες (Zhou, Park, Koltun, 2018).	41
Εικόνα 2.10: Open 3D - Παράδειγμα κατάτμησης PointCloud (Zhou, Park, Koltun, 2018).	42
Εικόνα 2.11: PointNet++ (Qi, Yi, Su, Guibas, 2017)	43
Εικόνα 2.12: Ντόρτμουντ - Το νέφος σημείων, η εφαρμογή της μάσκας βλάστησης, η ταξινόμηση του νέφους, και ο τελικός διαχωρισμός των κτιρίων (Ozdemir, Remondino 2018).	45

Εικόνα 2.13: Δημαρχείο Ντόρτμουντ. α) Μοντέλο από το Πυκνό Νέφος Σημείου b) Πρωτογενής εξαγωγή από Mapple c) Επεξεργασία στο PolyFit d) Τελικό Αποτέλεσμα Ανακατασκευής (Ozdemir, Remondino 2018).....	46
Εικόνα 2.14: Αποτυχημένη ανακατασκευή κτιρίου στην πόλη του Μπεργκάμο (Ozdemir, Remondino 2018).	47
Εικόνα 3.1: Απόσπασμα οικισμού από Google Earth.....	48
Εικόνα 3.2: Απόσπασμα αστικό ιστού από Google Earth.....	49
Εικόνα 3.3: Δημιουργία dataset .las.....	50
Εικόνα 3.4: Μοντέλο Υψομετρικό.....	51
Εικόνα 3.5: Όψεις.	51
Εικόνα 3.6: Κλίσεις.	51
Εικόνα 3.7: Ισοϋψείς.....	51
Εικόνα 3.8: Σημεία Εδάφους - Επιλογή Παραμέτρων.....	52
Εικόνα 3.9: Σημεία Εδάφους με καφέ χρώμα. Η πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στον οικισμό, η δεύτερη στην αστική περιοχή.....	53
Εικόνα 3.10: Ταξινόμηση Κτιρίων - Επιλογή Παραμέτρων.	55
Εικόνα 3.11: Ταξινόμηση Κτιρίων Οικισμού- Ελάχιστη Επιφάνεια 20 τμ.	55
Εικόνα 3.12: Ταξινόμηση Κτιρίων οικισμού - Ελάχιστη Επιφάνεια 1 τμ.	56
Εικόνα 3.13: Ταξινόμηση Κτιρίων αστικού ιστού - Ελάχιστη Επιφάνεια 1 τμ.	57
Εικόνα 3.14: Εισαγωγή Σημείων στο Agisoft.	58
Εικόνα 3.15: Οπτικοποίηση νέφους σημείων οικισμού.....	59
Εικόνα 3.16: Οπτικοποίηση νέφους σημείων αστικής περιοχής.....	59
Εικόνα 3.17: Επιλογές ταξινόμησης εδάφους.....	61
Εικόνα 3.18: Αποτελέσματα ταξινόμησης εδάφους σε RGB για την αστική περιοχή.....	62
Εικόνα 3.19: Αποτελέσματα ταξινόμησης εδάφους σε RGB για τον οικισμό.....	62
Εικόνα 3.20: Επιλογές ταξινόμησης νέφους.....	64
Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα ταξινόμησης οικισμού - όλες οι κλάσεις.....	64
Εικόνα 3.22: Αποτελέσματα ταξινόμησης οικισμού – Κτίρια RGB.	65
Εικόνα 3.23: Αποτελέσματα ταξινόμησης αστικής περιοχής - όλες οι κλάσεις.....	65
Εικόνα 3.24: Αποτελέσματα ταξινόμησης – Κτίρια RGB.....	66
Εικόνα 3.25: Ανάθεση σημείων θορύβου σε ξεχωριστή κλάση, το πάνω στιγμιότυπο στον οικισμό, το κάτω στον αστικό ιστό.....	67
Εικόνα 3.26: Ανάθεση σημείων - κτιρίων στην κλάση "κτίρια", το πάνω στιγμιότυπο στον οικισμό, το κάτω στον αστικό ιστό.....	68

Εικόνα 3.27: Στο πάνω στιγμιότυπο τα κτίρια της αυτόματης ταξινόμησης στον οικισμό. Στο κάτω, στον αστικό ιστό. Στο υπόμνημα αριστερά κάθε εικόνας αναφέρεται ο αριθμός των σημείων.	69
Εικόνα 3.28: Η πάνω εικόνα δείχνει τα μετρημένα σπίτια στο groundtruth, η κάτω στο πυκνό αυτόματα ταξινομημένο νέφος. Και οι δύο εικόνες αναφέρονται στον οικισμό.	70
Εικόνα 3.29: Πάνω τα κτίρια της αυτόματης ταξινόμησης, κάτω το groundtruth για τον αστικό ιστό. Στο υπόμνημα αριστερά κάθε εικόνας αναφέρεται ο αριθμός των σημείων.	71
Εικόνα 3.30: Η αριστερή εικόνα δείχνει τα μετρημένα σπίτια στο groundtruth, η δεξιά στο πυκνό αυτόματα ταξινομημένο νέφος. Και οι δύο εικόνες αναφέρονται στον αστικό ιστό.	72
Εικόνα 4.1: Σειρά εργασιών: (a) Νέφος Σημείων, (b) Επίπεδα τμήματα νέφους, (c) βοηθητικά επίπεδα των τμημάτων, (d) επίπεδα που προκύπτουν από συγχώνευση βοηθητικών επιπέδων (e), υποψήφιος προσόψεις αντικειμένου, (f) τελικό μοντέλο.	76
Εικόνα 4.2: Επεξεργασία νέφους στο Mapple.	76
Εικόνα 4.3: Δύο παραδείγματα για την κάλυψη. Τα πλέγματα a-shapes απεικονίζονται με κίτρινο και οι υποψήφιος όψεις με μοβ. Η κάθε τιμή αντιστοιχεί στην κάλυψη σε κάθε όψη.	80
Εικόνα 4.4: (a) Δύο επίπεδα τέμνονται με αποτέλεσμα να δημιουργούν τέσσερα νέα επίπεδα. Από το (b) μέχρι το (g) φαίνονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί που μπορούν να προκύψουν από την τομή τους.	81
Εικόνα 4.5: Εκτίμηση διανυσμάτων εκκλησίας στο Mapple.	83
Εικόνα 4.6: Επιλογή παραμέτρων εκκλησίας για την κατάτμηση.	84
Εικόνα 4.7: Ομαδοποίηση σημείων πλακοσκεπούς.	85
Εικόνα 4.8: Ομαδοποίηση σημείων εκκλησίας.	85
Εικόνα 4.9: Υποψήφια επίπεδα εκκλησίας.	86
Εικόνα 4.10: Δημιουργία επιπέδων εκκλησίας.	87
Εικόνα 4.11: Δημιουργία επιπέδων πλακοσκεπούς.	87
Εικόνα 4.12: Επεξεργασία σε για το πλακοσκεπές στα δύο λογισμικά.	88
Εικόνα 4.13: Επεξεργασία για την εκκλησία στα δύο λογισμικά.	88
Εικόνα 4.14: Τα τελικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τα δύο κτίρια του οικισμού.	89
Εικόνα 4.15: Αποτελέσματα μοντελοποίησης πρώτου κτιρίου αστικής περιοχής.	90

Εικόνα 4.16: Αποτελέσματα μοντελοποίησης δεύτερου κτιρίου αστικής περιοχής. ...	91
Εικόνα 4.17: Κατάτμηση νέφους οικισμού στο mapple (1).....	92
Εικόνα 4.18: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων περιοχής του οικισμού (1).	93
Εικόνα 4.19: Κατάτμηση νέφους οικισμού στο mapple (2).....	93
Εικόνα 4.20: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων περιοχής του οικισμού (2).	94
Εικόνα 4.21: : Κατάτμηση 2 κτιρίων του οικισμού στο mapple.....	95
Εικόνα 4.22: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.005$ m (2 κτίρια οικισμού).....	95
Εικόνα 4.23: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005$ m (2 κτίρια οικισμού).....	95
Εικόνα 4.24: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005$ m (3 κτίρια οικισμού).....	96
Εικόνα 4.25: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005$ m (4 κτίρια οικισμού).....	96
Εικόνα 4.26: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων κτιρίων της αστικής περιοχής (1).....	97
Εικόνα 4.27: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων κτιρίων της αστικής περιοχής (2).....	97
Εικόνα 4.28: Αποτελέσματα μοντελοποίησης 2 κτιρίων αστικής περιοχής (1).....	97
Εικόνα 4.29: Αποτελέσματα μοντελοποίησης 2 κτιρίων αστικής περιοχής (2).....	98
Εικόνα 4.30: Δημιουργία πρότυπων μοντέλων στο Geomagic - Εκκλησία.....	99
Εικόνα 4.31: Δημιουργία πρότυπων μοντέλων στο Geomagic - Πολυκατοικία.....	100
Εικόνα 4.32: Διαστασιολόγηση μοντέλων εκκλησίας. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.	101
Εικόνα 4.33: Εμβαδομέτρηση μοντέλων εκκλησίας. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.	102
Εικόνα 4.34: Διαστασιολόγηση μοντέλων κτιρίου στον αστικό ιστό. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.	102
Εικόνα 4.35: Εμβαδομέτρηση μοντέλων κτιρίου στον αστικό ιστό. Πάνω απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.	103
Εικόνα 4.36: Πίνακας Διαστασιολόγησης και εμβαδομέτρησης μοντέλων.	103

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η σημασία που αποκτά στις μέρες μας η μοντελοποίηση μιας πόλης (τρισδιάστατος αστικός σχεδιασμός) είναι μεγάλη, με πρώτο βέβαια και κύριο στοιχείο την μοντελοποίηση των κτιρίων της. Για το λόγο αυτό αποτελεί βασικό αντικείμενο μελέτης στην φωτογραμμετρία και την όραση υπολογιστών.

Σημαντικό στοιχείο σε κάθε περίπτωση είναι να ορίζεται σαφώς ο σκοπός της μοντελοποίησης. Τα τελευταία χρόνια, η μοντελοποίηση πόλεων και κτιρίων γίνεται όλο και πιο αναγκαία σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως για παράδειγμα αυτές που σχετίζονται με τον πολεοδομικό και αστικό σχεδιασμό, τη διαχείριση φυσικών καταστροφών, το τρισδιάστατο Κτηματολόγιο, τον κλάδο των τηλεπικοινωνιών και της κινητής τηλεφωνίας, τις Έξυπνες Πόλεις κ.λπ. Δεν πρόκειται για μια απλή διαδικασία γιατί απαιτεί τον συνδυασμό πολλών και διαφορετικών δεδομένων, δισδιάστατων και τρισδιάστατων, συνδυαστικά ενδεχομένως με τη χρήση των συμβατικών τοπογραφικών μετρήσεων και σύγχρονων λογισμικών.

Η σημαντικότερη πλευρά στην μοντελοποίηση των πόλεων είναι ο προσδιορισμός των κτιρίων της. Αυτό σημαίνει να καταγραφεί ο αριθμός των κτιρίων σε μια περιοχή μελέτης, το σχήμα και οι διαστάσεις τους, η κατανομή τους στο χώρο και η θέση τους. Στις πιο πολλές περιπτώσεις το σχήμα των κτιρίων προσδιορίζεται από αεροφωτογραφίες, σε συνδυασμό ενδεχομένως με ίχνη που έχουν προκύψει από επίγειες τοπογραφικές μετρήσεις ή από ψηφιοποίηση υψηλής ανάλυσης χαρτών. Ακόμα και αυτή η ακρίβεια δεν είναι όμως πολλές φορές η επιθυμητή, ενώ οι επίγειες μετρήσεις σε κάποιες περιπτώσεις είναι αντισυμβατικές και χρονοβόρες, με αποτέλεσμα να μην αποφεύγονται. Γενικά, τα τελευταία χρόνια γίνεται έρευνα από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα για να αυτοματοποιηθούν αυτές οι διαδικασίες.

Μια διαδεδομένη σήμερα μορφή δεδομένων για την αυτοματοποίηση εφαρμογών που αφορούν τη μοντελοποίηση των πόλεων και την καταγραφή κτιρίων είναι τα τρισδιάστατα νέφη σημείων. Τα νέφη σημείων μπορούν να προκύψουν από ενεργούς αισθητήρες, όπως αερομεταφερόμενα συστήματα ανίχνευσης λέιζερ (ALS) τα οποία

χρησιμοποιούν την αρχή της ανίχνευσης και καταγραφής φωτός (LiDAR), από σύγχρονα ολοκληρωμένα συστήματα Mobile Mapping, ακόμη και από τεχνικές συνταύτισης εικόνων που μπορούν να είναι δορυφορικές, εναέριες ή και επίγειες φωτογραφικές λήψεις για μεγαλύτερες κλίμακες (πχ. με τεχνικές SFM – Structure from Motion).

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι διαδικασίες και οι αλγόριθμοι που χρησιμεύουν για τον εντοπισμό της σκεπής/ταράτσας ενός κτιρίου από τρισδιάστατα νέφη σημείων ποικίλλουν, όπως και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται. Ορισμένοι αλγόριθμοι αναφέρονται σε LIDAR, άλλοι σε αεροφωτογραφίες, με εξαγωγή DSM, DTM ή συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Καθοριστικό ρόλο στον εντοπισμό και την μοντελοποίηση κτιρίων από νέφη σημείων τα τελευταία χρόνια διαδραματίζουν πλέον οι τεχνικές εκμάθησης μηχανής και τα νευρωνικά δίκτυα, που αποτελούν την επιτομή των πιο σύγχρονων μεθόδων στην αναγνώριση προτύπων.

Σε όλες τις περιπτώσεις και τις μεθόδους, η εξαγωγή κτιρίων από νέφη σημείων μπορεί γενικά να αναλυθεί σε τέσσερα συγκεκριμένα στάδια:

1. Ταξινόμηση του νέφους σημείων ώστε να αποκλειστούν το έδαφος, τα δέντρα και άλλα εκτός ενδιαφέροντος αστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα.
2. Απομόνωση των μεμονωμένων κτιρίων.
3. Κατά προσέγγιση καθορισμός των περιγραμμάτων των κτιρίων
4. Γενίκευση και κανονικοποίηση του σχήματος των κτισμάτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, . Μετά από μια εκτενή βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις σύγχρονες εξελίξεις που αφορούν το γνωστικό αντικείμενο, έγινε προσπάθεια να αναπτυχθεί μία μεθοδολογία που καλύπτει τους παραπάνω άξονες.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία συμπεριλαμβάνει μια ανασκόπηση των σημαντικότερων τεχνικών που αφορούν τον εντοπισμό και την εξαγωγή κτιρίων από νέφη σημείων καθώς και την πρόταση μίας αποτελεσματικής μεθοδολογικής προσέγγισης.

Έτσι, αναφέρονται τεχνικές που αποτέλεσαν βάση για το πεδίο της έρευνας, καθώς και οι πιο σύγχρονες που αποτελούν την αιχμή της εξέλιξης του συγκεκριμένου επιστημονικού πεδίου. Από τις τεχνικές αυτές και τη βιβλιογραφική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, αναπτύχθηκε μια ροή εργασιών με σκοπό την ταξινόμηση και την μοντελοποίηση κτιρίων από νέφη σημείων σε δύο διαφορετικές περιοχές μελέτης, μια αστική περιοχή και έναν μικρότερο οικισμό.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από πέντε ενότητες. Η πρώτη περιλαμβάνει μια ανασκόπηση των σημαντικότερων τεχνικών που αφορούν τον εντοπισμό και την εξαγωγή κτιρίων από νέφη σημείων. Εξετάζονται και αναλύονται τεχνικές από την διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, τα οποία συμπεριλαμβάνουν τις πρώτες προσπάθειες για την αυτόματη εξαγωγή κτιρίων, καθώς και τρεις ιδιαίτερες μεθοδολογίες με στοιχεία που αξιοποιήθηκαν και στη συνέχεια.

Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει αποκλειστικά τεχνολογίες αιχμής που βασίζονται στην εκμάθηση μηχανής και τα νευρωνικά δίκτυα.

Στην τρίτη ενότητα γίνεται ανάλυση και αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιήθηκε με δύο διαφορετικά εμπορικά λογισμικά στα δύο σετ δεδομένων.

Στην τέταρτη ενότητα περιλαμβάνεται η ανάλυση της μεθόδου μοντελοποίησης των κτισμάτων μέσω δύο ελεύθερων λογισμικών, καθώς και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στην τελευταία ενότητα συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας, ενώ επισημαίνονται και οι βασικοί άξονες στους οποίους θα μπορούσε να προσανατολιστεί μελλοντικά το ερευνητικό ενδιαφέρον.

Automatic Building Extraction from 3D Point Clouds

by Christos Kontostathis

Postgraduate Diploma Thesis

Postgraduate Programme “Geospatial Technologies”,
Department of Surveying and Geoinformatics Engineering,
University of West Attica, Athens, Greece
June 2020

ABSTRACT

The present postgraduate thesis includes an overview of the most important recent techniques for locating and extracting buildings from 3D cloud points as well as the proposal of an effective methodological approach based on contemporary techniques.

Techniques that have formed the basis for the relevant research are reviewed, along with the most recent ones that represent state-of-the-art in this specific scientific field. Based on these techniques and the bibliographic study carried out, a workflow was formulated for classifying and modeling buildings from point clouds in two different study areas, an urban area and a smaller settlement.

This study consists of five sections. The first section includes a review of the most important techniques for locating and extracting buildings from point clouds. Techniques reported in the international literature are examined and analyzed, which include the initial efforts to automate building extraction, as well as three special methodologies with data that were also later used.

The second section includes exclusively cutting-edge technologies based on machine learning and neural networks. The third section analyzes and evaluates the classification carried out with two different commercially available software packages on the two data sets. The fourth section includes the analysis of the method of building modeling using two free software packages, as well as the evaluation of the results.

The last section summarizes the overall conclusions that emerged during the preparation of the work, as well as the main axes along which the research interest could be directed in the future.

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΕ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ

1.1. Εισαγωγή

Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τον εντοπισμό και την εξαγωγή κτιρίων παρουσιάζουν κατακόρυφη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται εν προκειμένω υπόψη για την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων έχουν άμεση σχέση με το σκοπό για τον οποίο ζητείται σε κάθε περίπτωση ο εντοπισμός και η εξαγωγή κτιρίων, καθώς το αποτέλεσμα αξιολογείται κάθε φορά από την αξιοπιστία και την ακρίβειά του ό και το χρόνο και το κόστος των διαδικασιών.

Οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι που χρησιμεύουν για τον εντοπισμό της στέγης ενός ή περισσότερων κτιρίων από τρισδιάστατα νέφη σημείων ποικίλλουν. Με το συνδυασμό μεθόδων, μαθηματικών μοντέλων για τον εντοπισμό και την κανονικοποίηση των κτιρίων, αλλά και πληροφορίας στον 2D, 2.5D και 3D χώρο επιτυγχάνονται αξιόλογα αποτελέσματα στον αυτόματο εντοπισμό κτιρίων.

Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στα αποτελέσματα αυτά έχουν σχέση με τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Τον τρόπο με τον οποίο δημιουργήθηκε σε κάθε περίπτωση το νέφος σημείων, αν είναι δηλαδή φωτογραμμετρικό προϊόν ή από Lidar.
2. Τον όγκο των δεδομένων που αξιοποιούνται και πώς αυτός καθίσταται διαχειρίσιμος.
3. Τον θόρυβο που υπάρχει στα δεδομένα και πώς αυτός θα εξαλειφθεί.
4. Την επάρκεια πληροφορίας για να εντοπιστούν και να μοντελοποιηθούν σωστά τα κτίρια.
5. Την κλίμακα της περιοχής που εξετάζεται ανά περίπτωση και πώς ο όγκος και η πυκνότητα των δεδομένων προσαρμόζεται ανάλογα.
6. Την πολυπλοκότητα στο σχήμα των κτιρίων και το μέγεθός τους και η εύρεση των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων για τον προσδιορισμό τους.

Σε επόμενα κεφάλαια θα επιχειρηθεί να αξιοποιηθούν τεχνικές που αναφέρονται στο πλαίσιο της θεωρητικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε για την επεξεργασία του νέφους σημείων, με στόχο την κατάτμηση και ταξινόμησή του για τον εντοπισμό των κτιρίων και, στη συνέχεια, τη μοντελοποίησή τους.

Στόχος είναι εδώ να γίνει, σε αυτή την επεξεργασία, εκμετάλλευση διάφορων ελεύθερων και μη λογισμικών, τα οποία βασίζονται σε σύγχρονες τεχνικές εκμάθησης μηχανής και αξιοποιούν αρκετά από τα εξεταζόμενα μαθηματικά και γεωμετρικά μοντέλα.

1.2. Τεχνικές που αναπτύχθηκαν αρχικά

Τις τελευταίες δεκαετίες, και ειδικά τα τελευταία 20 χρόνια, έχουν αναπτυχθεί οι πιο ενδιαφέρουσες μέθοδοι με στόχο το βέλτιστο αποτέλεσμα όσον αφορά τον εντοπισμό και την εξαγωγή περιγραμμάτων κτιρίων.

Στη διδακτορική διατριβή του Ma (2004) το πρώτο βήμα για την εξαγωγή των ορίων πραγματοποιούνταν με κατάτμηση ενός κανονικοποιημένου ψηφιακού μοντέλου Εδάφους (DTM) με βάση τον καθορισμό κατωφλιού για το υψόμετρο των σημείων, προκειμένου να εξαιρεθούν τα ανεπιθύμητα στοιχεία. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ορισμένα φίλτρα με σκοπό να γίνει εξαγωγή των ορίων σε διανυσματική μορφή με τη βοήθεια ενός έτοιμου λογισμικού.

Οι Li & Xue (2005) περιέγραψαν μεθοδολογία για την εξαγωγή τέτοιας πληροφορίας από DSM και δορυφορικές εικόνες με μεθόδους ανάλυσης των σκιών στη δορυφορική εικόνα και ανακατασκευή των ορίων των κτιρίων. Μετά από τρία χρόνια, ο Sohn (2008) χρησιμοποίησε την μεθοδολογία αυτή ως βάση για την ανίχνευση ακμών στην εικόνα με τον αλγόριθμο Burns. Σε αυτή την περίπτωση οι εικονοψηφίδες ομαδοποιούνται με κριτήρια προσανατολισμού κλίσης, και η δομή της σχετικής επιφάνειας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης και των ιδιοτήτων της ακμής.

Σε μία διαφορετική προσέγγιση από τον Liang (2005) χρησιμοποιείται η τυπική απόκλιση μεταξύ των σημείων. Εντοπίζονται τα δύο πιο απομακρυσμένα σημεία της

περιοχής που ορίζει το κτίριο, και στη συνέχεια αυτή η περιοχή χωρίζεται στα δύο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι η απόσταση των σημείων να φτάσει ένα ορισμένο κατώφλι που έχει ορίσει ο χρήστης.

Προηγουμένως ο You (2001) είχε αναπτύξει έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην πρόβλεψη της διεύθυνσης του αζιμουθίου. Η μέθοδός του είναι να διαχωρίζει συνεχώς τα σημεία ακμών του κοντινότερου ορίου του κτιρίου. Παράλληλα ομαδοποιούνται τα σημεία που βρίσκονται στις ακμές και αξιοποιούνται για να υπολογιστεί ο βασικός προσανατολισμός του κτιρίου, ο οποίος χρησιμοποιείται για την τελική εξαγωγή των ακμών του.

Οι παραπάνω τεχνικές αναπτύχθηκαν κυρίως στον 2D χώρο, μπορούν να αξιοποιηθούν όμως με την ίδια ευκολία και στον χώρο των τριών διαστάσεων. Το ζήτημα με τις εν λόγω τεχνικές είναι ο μεγάλος όγκος των υπολογισμών που απαιτείται.

Όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά, ένα σημαντικό κομμάτι είναι η κατάτμηση του νέφους σημείων ώστε να ξεχωρίσουν τα κτίρια με τις ακμές τους από τα σημεία που αντιπροσωπεύουν άλλα αντικείμενα. Οι αλγόριθμοι κατάτμησης σε νέφη σημείων για την εξαγωγή κτιρίων κατηγοριοποιούνται από τον Shan (2009) σε 5 ομάδες:

1. Ανίχνευσης ακμών: Σε αυτή την περίπτωση τα δεδομένα μετατρέπονται σε εικόνα, συνήθως DSM, από 3D Point Cloud σε εικόνες 2.5D.
2. Ανάπτυξης επιφανειών: Με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ή τον μετασχηματισμό Hough ή Ransac εντοπίζονται επίπεδες και μη επιφάνειες, και στη συνέχεια ομαδοποιούνται σημεία με κριτήρια ομοιότητας όπως η εγγύτητα, η κλίση, η καμπυλότητα κ.λπ.
3. Γραμμικές μέθοδοι σάρωσης: Υιοθετούν μια στρατηγική κατάτμησης και συνένωσης του νέφους σημείων, ενώ ελέγχεται η απόσταση των σημείων του κάθε τμήματος από την γραμμή σάρωσης. Στη συνέχεια, αφού επιλεγεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι, γίνεται ομαδοποίηση των σημείων.
4. Μέθοδοι ταξινόμησης: Κάθε σημείο του νέφους σχετίζεται με ένα διάνυσμα στο οποίο συμπεριλαμβάνεται γεωμετρική και ραδιομετρική πληροφορία. Στη

συνέχεια γίνεται ομαδοποίηση με μεθόδους όπως: αλγόριθμος k-means, συνάρτηση μέγιστης πιθανοφάνειας, ασαφής ομαδοποίηση κ.λπ.

5. Μέθοδοι κατανομής γραφημάτων: Αυτά τα διαγράμματα περιγράφουν την εγγύτητα των σημείων. Είναι της μορφής “G (V, E)” όπου “V” τα σημεία και “E” οι ακμές που τα ενώνουν. Έτσι ο αλγόριθμος ποσοτικοποιεί την ομοιότητα στα ζεύγη των σημείων.

Στο ίδιο άρθρο περιγράφεται ένας νέος αλγόριθμος ο οποίος λειτουργεί σε τρεις φάσεις:

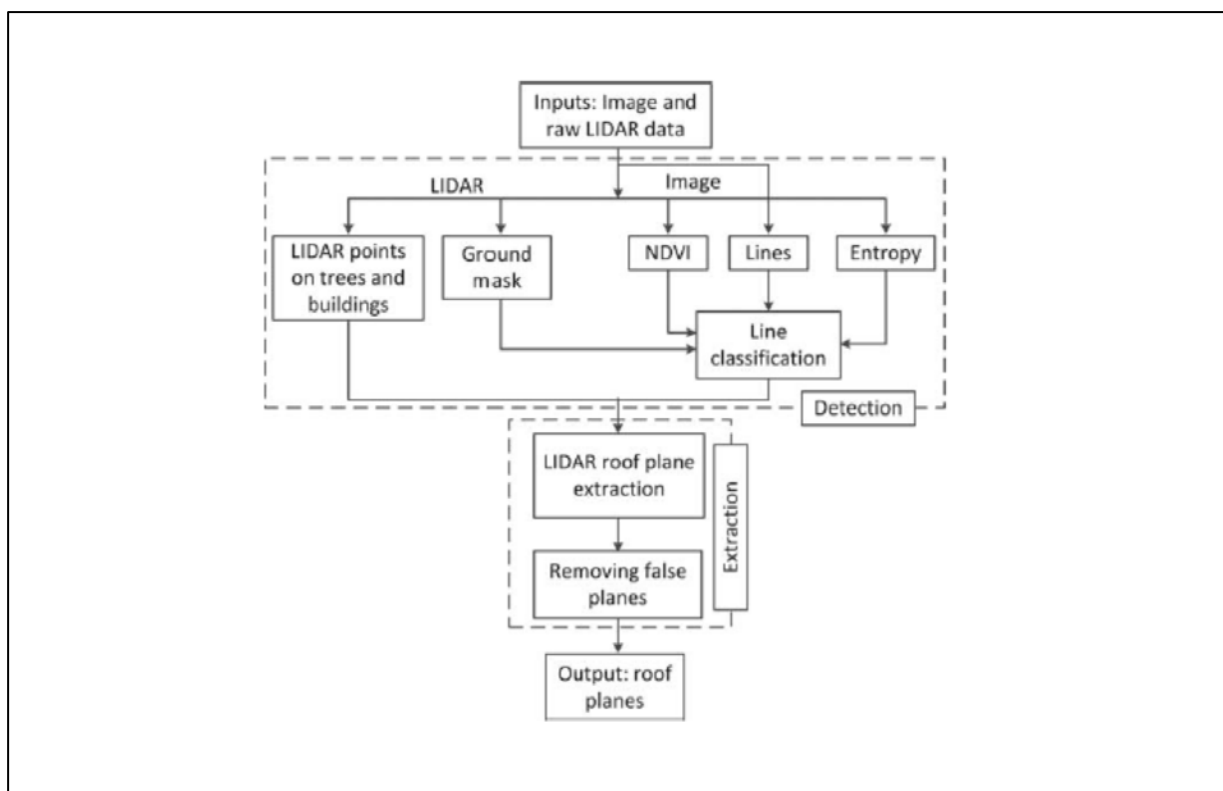
1. Σημαίνονται τα σημεία που οριοθετούν το περίγραμμα του κτιρίου με την τεχνική του εγγύτερου γείτονα (jump edges) και αραιώνεται το νέφος σημείων.
2. Ενώνονται τα σημεία αυτά με άλλες μεθόδους εγγύτητας (k-means, G (V, E)) έτσι ώστε να απομακρυνθούν εκείνα που δεν χρειάζονται.
3. Διαχωρίζονται τα δέντρα από τα κτίρια με τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των σημείων αυτών.

Ο αλγόριθμος που αναπτύσσεται δοκιμάζεται σε δύο ομάδες εναέριων δεδομένων. Η πρώτη καταδεικνύει τη δυνατότητα εξαγωγής στέγης πολλαπλών στρώσεων σε ένα πολύπλοκο κτίριο. Ο δεύτερος στόχος είναι να δοκιμαστεί η απόδοση του αλγορίθμου για την εξαγωγή πολυκατοικιών σε μια εκτεταμένη περιοχή. Πάντως, στο συγκεκριμένο άρθρο απουσιάζουν αποτελέσματα και συμπεράσματα από την συγκεκριμένη προσέγγιση.

Στην έρευνα που έκανε ο Awrangjebto (2013) αξιοποιώντας το ύψος από ένα Ψηφιακό Υψομετρικό Μοντέλο (DEM), διαχώρισε αρχικά τα δεδομένα LIDAR σε δύο ομάδες: τα σημεία εδάφους και τα υπόλοιπα, τα οποία μπορεί να είναι κτίρια, δέντρα κ.λπ. Αυτός ο διαχωρισμός πραγματοποιήθηκε με μία “μάσκα εδάφους”.

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τα σημεία μη εδάφους τα οποία έχουν ταξινομηθεί με μια καινοτόμο τεχνική κατάτμησης εικόνας για την εξαγωγή στεγών κτιρίων. Οι ακμές εξαγονται από ασπρόμαυρες ορθοφωτογραφίες και στη συνέχεια ταξινομούνται σε διάφορες κλάσεις όπως «έδαφος», «δέντρο», «άκρη στέγης» και «κορυφογραμμή στέγης» με χρήση της μάσκας εδάφους όσο και του χρώματος και της υψής από την ορθοφωτογραφία. Κατά την κατάτμηση των σημείων LIDAR που δεν ανήκουν στο

έδαφος, οι γραμμές από τις δύο τελευταίες κατηγορίες χρησιμοποιούνται ως βασικές γραμμές για να εντοπιστούν τα κοντινότερα σημεία των γειτονικών επιφανειών. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή η συλλογή των δεδομένων LIDAR έγινε ανά 0.17 m (35 σημεία/m²) και μία έγχρωμη αεροφωτογραφία ανάλυσης 0.05 m. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να απομακρύνει επιτυχώς τη βλάστηση και έτσι να εξάγονται οι οροφές των κτιρίων με υψηλά ποσοστά επιτυχίας. Ωστόσο, με τη μέθοδο αυτή δεν εντοπίστηκαν επιτυχώς τα μικρότερα κτίρια.



Εικόνα 1.1: Μεθοδολογία του Awrangjeb (2013)

Σε έρευνα των Sampath & Shan (2010) ακολουθήθηκε περίπου η ίδια διαδικασία, με τη διαφορά ότι δεν εντοπίστηκαν τα κοντινότερα σημεία των γειτονικών επιφανειών με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα, αλλά χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος “k-means” για τον εντοπισμό των σημείων. Το αποτέλεσμα συμπεριελάμβανε υψηλό σφάλμα κατά την ανακατασκευή των κτιρίων.

1.3. Μια διαφορετική προσέγγιση σε δεδομένα Lidar

Μέχρι το 2009 υπήρχαν αλγόριθμοι οι οποίοι αξιοποιούνταν για τον εντοπισμό των ορίων των κτιρίων μέσω της ανίχνευσης ακμών και αζιμουθίων. Μία συγκεκριμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε τη συγκεκριμένη χρονιά από τον Wei (2009) ξεχώρισε από τις προηγούμενες τεχνικές.

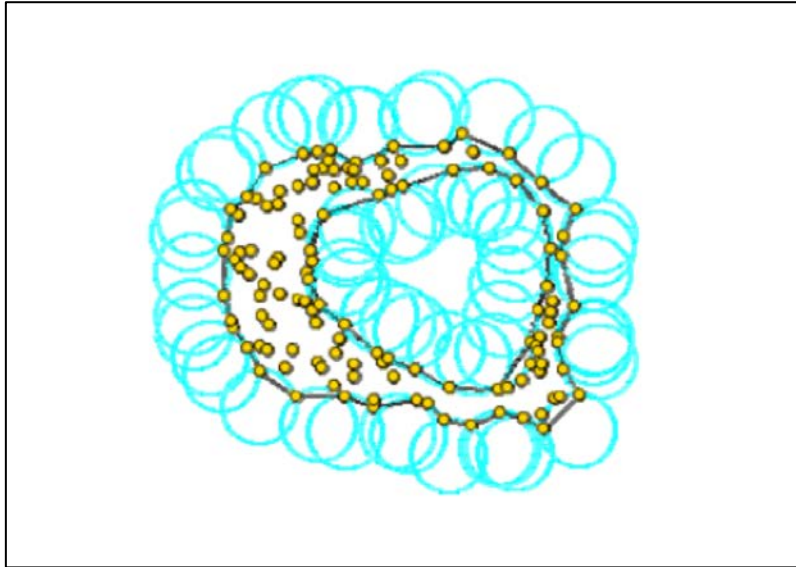
Σε σχέση με τους μέχρι τότε αλγόριθμους, ο αλγόριθμος Alpha Shapes λειτούργησε πιο αποτελεσματικά για την εξαγωγή των εσωτερικών και εξωτερικών ορίων των κτιρίων με πιο πολύπλοκα πολυγωνικά σχήματα. Είναι ένας αλγόριθμος που ταυτόχρονα φιλτράρει τα αποτυπώματα των σημείων που δεν αποτελούν κτίρια. Η μεθοδολογία συνοδεύεται από δύο τεχνικές για την κανονικοποίηση του αποτελέσματος που προκύπτει από τον αλγόριθμο Alpha Shapes.

Στο εισαγωγικό κομμάτι εκείνου του άρθρου γίνεται μια αναφορά στα συστήματα LIDAR, ενεργών συστημάτων τηλεανίχνευσης με πλεονεκτήματά για την χαρτογράφηση των αστικών κέντρων, την ταχύτητά τους, την πυκνότητα της πληροφορίας, την καλή ακρίβεια και το χαμηλό κόστος. Τα δεδομένα LIDAR μπορούν να χαρακτηριστούν ως υποκατηγορία του νέφους σημείων 3D και ενδέχεται να περιέχουν περισσότερες πληροφορίες από ένα μοντέλο επιφάνειας 2.5D. Όμως, τα στοιχεία όπως η τυχαία συλλογή των σημείων και η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία του κτιρίου οδηγούν στις δυσκολίες της εξαγωγής κτιρίων. Έτσι, η συλλογή δεδομένων LIDAR και ο εντοπισμός επιφανειών με σκοπό την εξαγωγή κτιρίων επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως ο θόρυβος, η ακρίβεια στη θέση, η έλλειψη πληροφορίας σε κάποιες περιοχές, η μεγάλη ποσότητα δεδομένων που καθυστερεί τους υπολογισμούς κλπ. (Maltezos & Ioannidis, 2016).

Το νέφος σημείων που προκύπτει από τα Lidar ψηφιοποιείται οριζοντιογραφικά σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους στην κλίμακα του γκρίζου το οποίο υφίσταται, επεξεργασία και κανονικοποίηση. Με μεθόδους επεξεργασίας εικόνας, όπως ταξινόμηση ή εξαγωγή ακμών από εικόνες, γίνεται η εξαγωγή των ορίων των κτιρίων.

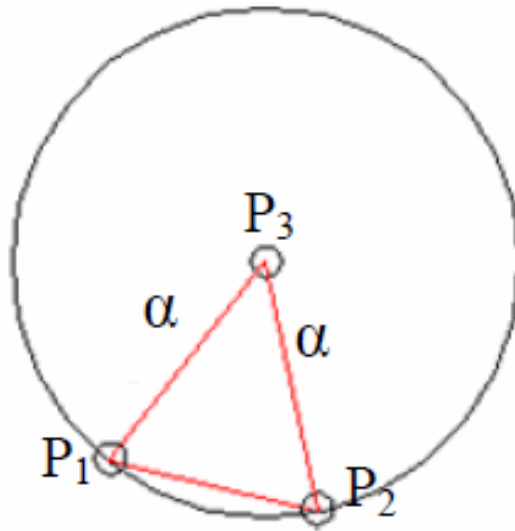
Από την άλλη μεριά, ο αλγόριθμος Alpha Shapes απαιτεί λιγότερους υπολογισμούς. Στηρίζεται σε κύκλο (ή σφαίρα αν αναφερόμαστε για τον 3D χώρο) με συγκεκριμένη

ακτίνα «α», ο οποίος κατά κάποιον τρόπο «κυλάει» στο νέφος σημείων S ανακατασκευάζοντας τα όρια του αντικειμένου και εν προκειμένω του κτιρίου. Ελέγχει έτσι ποια σημεία σχηματίζουν τις ακμές, ανάλογα με την ακτίνα που έχει οριστεί για κατώφλι.



Εικόνα 1.2: Αρχή εξαγωγής στον αλγόριθμο Alpha Shapes.

Σε ένα σετ δεδομένων S που αποτελείται από « n » σημεία, μπορούν να σχηματιστούν « $n \times (n - 1)$ » γραμμές. Το ζήτημα είναι ποιες από αυτές είναι όρια κτιρίων. Έστω κύκλος με ακτίνα «α», σημεία “P1” και “P2” στην περίμετρο του κύκλου και “P3” το κέντρο του κύκλου. Αν δεν υπάρχει άλλο σημείο μέσα στον κύκλο εκτός από τα “P1” και “P2”, τότε αυτά ορίζονται αυτόματα ως σημεία του κύκλου και ενώνονται για να αποτελέσουν γραμμή ορίου.



Εικόνα 1.3: Εντοπισμός σημείων - ορίων με AlphaShapes.

Το κέντρο του κύκλου προσδιορίζεται από τους τύπους ενός συγκεκριμένου αλγορίθμου (Hong, 2006):

$$\begin{cases} x_3 = x_1 + \frac{1}{2}(x_2 - x_1) + H(y_2 - y_1) \\ y_3 = y_1 + \frac{1}{2}(y_2 - y_1) + H(x_1 - x_2) \end{cases}$$

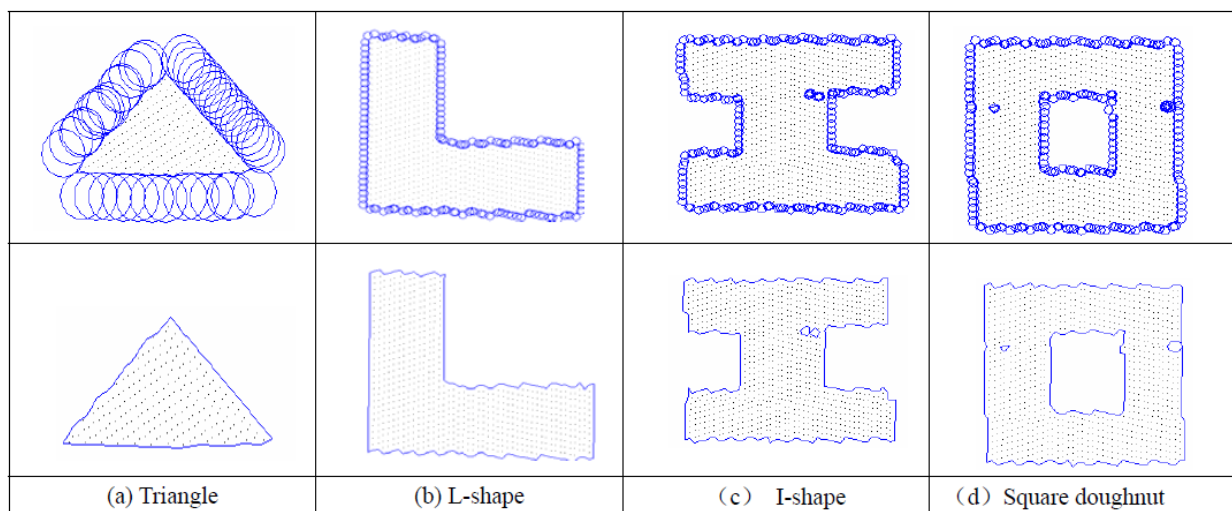
όπου:

$$H = \sqrt{\frac{a^2}{S^2_{P1P2}} - \frac{1}{4}} \quad \text{και} \quad S^2_{P1P2} = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2$$

Όταν λοιπόν υπολογίζεται το κέντρο, αν η απόσταση μεταξύ των υπόλοιπων σημείων και του κέντρου του κύκλου είναι μεγαλύτερη από α , τότε δεν υπάρχει άλλο σημείο μέσα στον κύκλο, και στη συνέχεια τα P_1 και P_2 ορίζονται ως οριογραμμή του κτιρίου. Σε περίπτωση που η απόσταση ενός σημείου είναι μικρότερη από την ακτίνα, επιλέγεται το επόμενο σημείο P_1 μέσα στον κύκλο που έχει δημιουργηθεί και οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται εκ νέου.

Ο αλγόριθμος αυτός δοκιμάστηκε στο κέντρο πόλης της Μαλαισίας, με δεδομένα Lidar που προέκυψαν το 2002 από αισθητήρα OPTeCH. Η πυκνότητα του νέφους σημείων ήταν 6 σημεία /m² και η οριζόντια ακρίβεια 15 cm.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως ο αλγόριθμος μπορεί να αξιοποιηθεί σε κάθε περίπτωση πολυγωνικού σχήματος, κυρτού ή κοίλου. Στην πρώτη περίπτωση, για την εξαγωγή γραμμών με μεγαλύτερη εξομάλυνση, όπως τα a και d (Εικ. 1.4), καλύτερα να επιλέγεται μεγάλο α , μερικές φορές να τείνει και στο άπειρο. Για κοίλα πολύγωνα (σχήματα b, c), επισημαίνεται πως το α πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στην μέση απόσταση των σημείων του νέφους και στο διπλάσιό της.

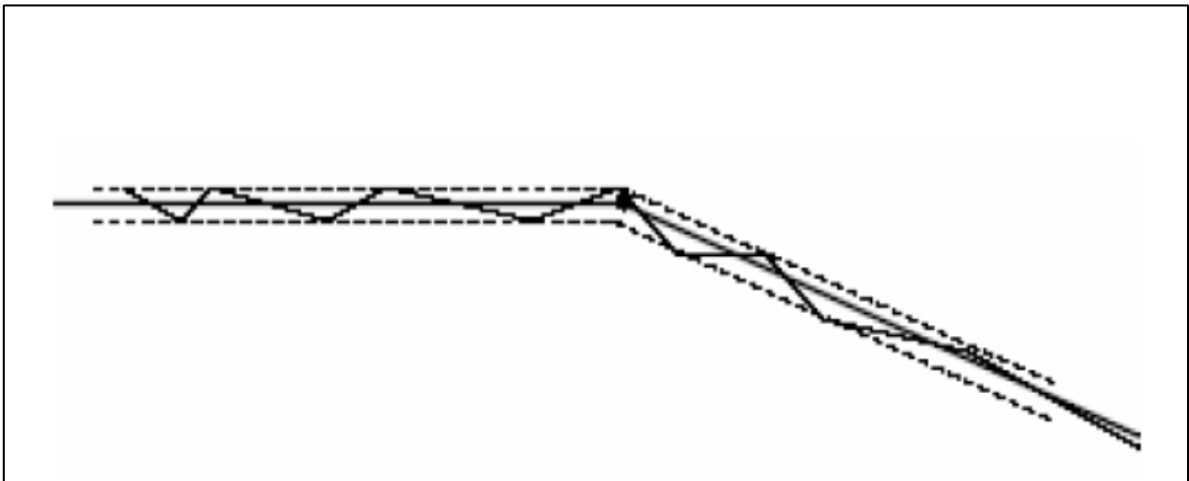


Εικόνα 1.4: Αποτελέσματα εντοπισμού κτιρίων με Alpha Shapes.

Στη συγκεκριμένη μελέτη αξιοποιούνται δύο επιπλέον αλγόριθμοι για την κανονικοποίηση και την απλοποίηση του αποτελέσματος.

1. Ο αλγόριθμος “σωλήνας”, ο οποίος αξιοποιεί τον εντοπισμό των κλίσεων. Ο αλγόριθμος “Pipe” ανακτά τα σημεία “εμπλοκής” του πολυγώνου κρίνοντας τις αλλαγές κατεύθυνσης του σωλήνα. Ένας σωλήνας με διάμετρο d έχει χρησιμοποιηθεί για την ερμηνεία των αλλαγών του, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.5. Αν η διαφορά μεταξύ των σημείων στην γραμμή του ορίου είναι μικρότερη από d , αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές αλλαγές στο όριο όπου βρίσκονται τα ενδιάμεσα σημεία και αυτά μπορούν να αφαιρεθούν. Ωστόσο, αν η διαφορά μεταξύ των σημείων είναι μεγαλύτερη από d , αυτό δείχνει ότι το

σημείο είναι όριο και θα πρέπει να παραμείνει. Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι τα σημεία των κτιρίων που μπορεί να επεξεργαστεί με ευελιξία. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές στο αζιμούθιο της γραμμής έτσι ώστε να πραγματοποιείται η κανονικοποίηση χωρίς να αλλοιώνεται το σχήμα των κτιρίων.



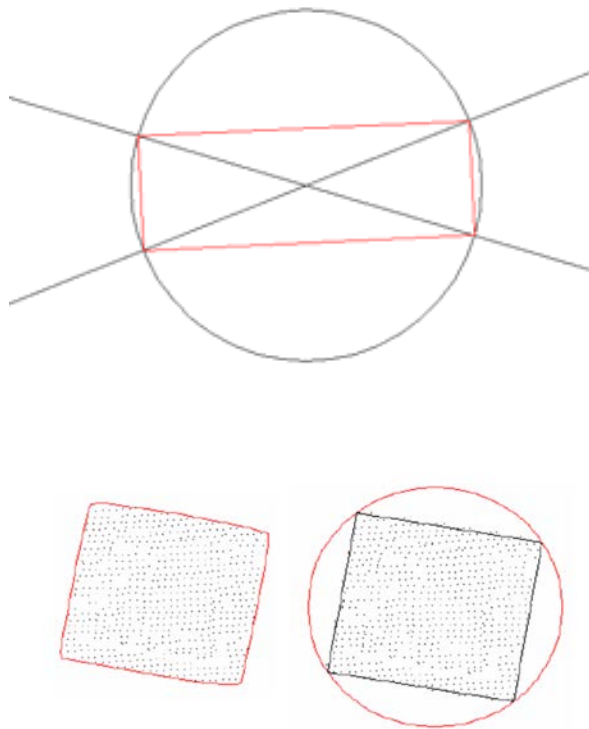
Εικόνα 1.5: Ο αλγόριθμος «Pipe».

2. Ο αλγόριθμος Circumcircle, ο οποίος εντοπίζει τα εσωτερικά και τα εξωτερικά όρια του αντικειμένου με ταχύτητα φιλτράροντας παράλληλα την πληροφορία. Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να εξαναγκάσει ένα ακανόνιστο τετράγωνο να γίνει ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Η αρχή της γεωμετρίας είναι ότι η γωνία που σχηματίζεται από τη διάμετρο και το σημείο του κύκλου είναι ορθή, όπως φαίνεται στην Εικ. 1.7. Με βάση αυτή την αρχή, ο αλγόριθμος περιγράφεται ως εξής:

α. Εντοπίζεται πρώτα η τομή των δύο διαγώνιων γραμμών του ορθογώνιου. Αυτό το σημείο τομής λειτουργεί ως γεωμετρικό κέντρο του πολυγώνου και του αλγορίθμου.

β. Η μεγαλύτερη απόσταση του σημείου τομής με τους τέσσερις κόμβους υπολογίζονται ως ακτίνα (ή ο μέσος όρος της απόστασης ως ακτίνα) για να σχεδιαστεί ο κύκλος.

γ. Προσδιορίζονται τέσσερα σημεία τομής μεταξύ του κύκλου και των δύο διαγώνιων γραμμών, και με σύνδεσή τους σχηματίζεται ένα νέο ορθογώνιο.



Εικόνα 1.6: Ο αλγόριθμος «Circumcircle».

Στη συγκεκριμένη έρευνα, όπου πρώτη φορά αξιοποιήθηκε ο συγκεκριμένος αλγόριθμος για την εξαγωγή κτιρίων από νέφος σημείων που προέκυψε από δεδομένα Lidar, μπορούν να συνοψιστούν τα εξής συμπεράσματα για τον αλγόριθμο:

1. Χρησιμεύει περισσότερο σε κοίλα αλλά και σε κυρτά πολύγωνα.
2. Πραγματοποιούνται γρήγοροι υπολογισμοί, χωρίς τη χρονοβόρα διαδικασία της δημιουργίας τριγώνων.
3. Χρησιμεύει τόσο για την εξαγωγή τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών ορίων των κτιρίων.
4. Ανάλογα με την τιμή στην ακτίνα α , μπορούν να εξαχθούν όρια κτιρίων διαφορετικού σχήματος και μεγέθους.
5. Υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού με διάφορα φίλτρα εξομάλυνσης, αφαίρεσης θορύβου ή και κάλυψης κενών που μπορούν να δημιουργηθούν από τον αλγόριθμο.

Όσον αφορά την ακρίβεια του αποτελέσματος, ο συγγραφέας του άρθρου αναφέρει πως τα αποτελέσματα στην εξαγωγή κτιρίων μπορούν να οφείλονται τόσο στην

διαδικασία μοντελοποίησης με τον αλγόριθμο, όσο όμως και στα ίδια δεδομένα Lidar που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία εμπεριέχουν και από μόνα τους σφάλματα. Η σύγκριση του αποτελέσματος έγινε με δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής ανάλυσης (Quickbird) και δεδομένα που προέκυψαν με τοπογραφικές μεθόδους εδάφους. Οι διαφορές ανάμεσα στα ανακατασκευασμένα όρια και τις πραγματικές μετρήσεις ήταν μικρότερες από 0.5 m.

1.4. Εξαγωγή κτιρίων από δεδομένα MMS με συνδυασμό μεθόδων

Μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για την εξαγωγή ιχνών κτιρίων από τρισδιάστατα νέφη αποτελεί έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2009 και εξετάζει τον συνδυασμό αλγορίθμων ταξινόμησης και ανάπτυξης επιφανειών σε συστήματα MMS (Mobile Mapping Systems).

Τα γεωχωρικά δεδομένα που αφορούν νέφη σημείων και είναι απαραίτητα για την χαρτογράφηση πόλεων και συγκεκριμένα κτιρίων μπορούν επίσης να προκύψουν από σύγχρονα ολοκληρωμένα συστήματα MMS. Σύμφωνα με τους Hammoudiet al. (2009) αυτά συλλέγονται από ένα κινητό όχημα, που τυπικά είναι εξοπλισμένο με μια σειρά φωτογραφικών μηχανών, ραντάρ, λέιζερ, LiDAR ή οποιουδήποτε συστήματος τηλεπισκόπησης. Τέτοια συστήματα αποτελούνται από μια ολοκληρωμένη σειρά συγχρονισμένων αισθητήρων πλοήγησης και αισθητήρων απεικόνισης τοποθετημένων σε κινητή πλατφόρμα.

Η μεθοδολογία που εξετάζεται σε αυτή τη μελέτη έχει τα εξής στάδια: Μετά από το φιλτράρισμα που πραγματοποιείται στο νέφος σημείων, γίνεται εξαγωγή επιφανειών συνδυάζοντας το μετασχηματισμό Hough, τον αλγόριθμο ταξινόμησης K-means και τελικά τον αλγόριθμο Ransac. Στη συνέχεια, από αυτές τις επιφάνειες εκτιμώνται τα αποτυπώματα του κτιρίου.

Το MMS το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν εξοπλισμένο με έναν σαρωτή Laser, ένα GPS, ένα αδρανειακό σύστημα μετρήσεων (IMS) και ένα οδόμετρο. Αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το συγκεκριμένο εγχείρημα, όπως τα κενά πληροφορίας σε πολλές περιπτώσεις εξαιτίας στατικών και κινούμενων εμποδίων, η ανακλαστικότητα του laser σε σημεία τα οποία

μοντελοποιούν επιφάνειες διαφορετικού υλικού και χαμηλής ανακλαστικότητας, καθώς και η υπερπληθώρα δεδομένων η οποία μπορεί να βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως όταν το όχημα σταματάει και συνεχίζει να καταγράφει πληροφορία. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να δημιουργήσουν δυσκολίες και λαμβάνονται υπόψη σε αυτή την έρευνα.

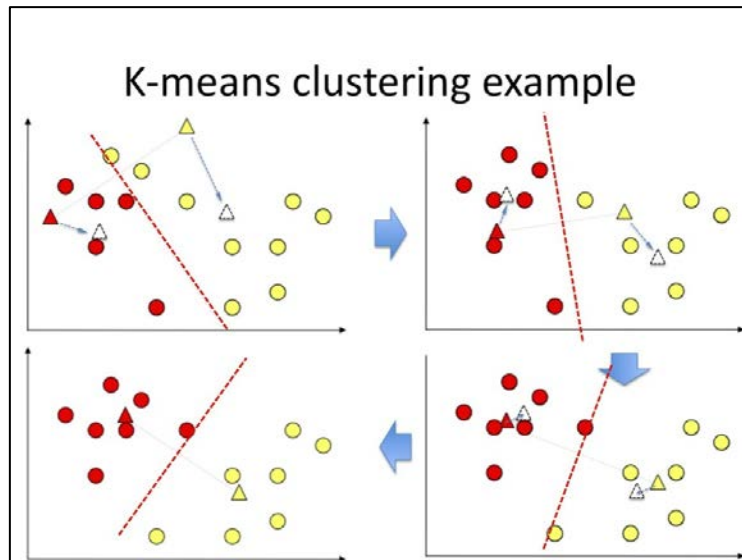
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η προσέγγιση η οποία αποτελείται από δύο στάδια, αυτό της προεπεξεργασίας των δεδομένων και το δεύτερο της εξαγωγής των αποτυπωμάτων των κτιρίων.

Σε πρώτη φάση πραγματοποιείται φιλτράρισμα το οποίο αφορά την περιττή πληροφορία και βασίζεται κυρίως στις αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές φιλτραρίσματος. Άξια αναφοράς είναι η χαρτογράφηση του νέφους σημείου 3D σε 2D, διαδικασία που αφενός αφαιρεί το θόρυβο και τα απομακρυσμένα σημεία και αφετέρου είναι μια αρκετά συμπαγής εικόνα του φιλτραρισμένου νέφους σημείων. Πραγματοποιείται με την προβολή του νέφους σε έναν οριζόντιο δισδιάστατο κάναβο, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύεται από μία τιμή σε αυτόν. Εφόσον το κατώφλι των τιμών έχει οριστεί, ο αλγόριθμος κρατάει τα σημεία τα οποία ξεπερνούν από το κατώφλι αυτό.

Σε δεύτερη φάση, για την εξαγωγή αποτυπωμάτων, αρχικά αξιοποιείται ο μετασχηματισμός Hough οποίος αφορά τον εντοπισμό ευθειών με τύπο εξίσωσης $r = x \times \cos\theta + y \times \sin\theta$ και όχι της μορφής $y = a \times x + b$, γιατί η τελευταία δυσκολεύει τον εντοπισμό ευθειών κάθετων και παράλληλων στον άξονα x. Για κάθε σημείο (r, θ) ο μετασχηματισμός τους δίνει την ευθεία με το σημείο τομής.

Για την ταξινόμηση σημείων αυτών πριν από τον εντοπισμό των ευθειών αξιοποιείται ο αλγόριθμος K-Means οποίος λειτουργεί σε τρεις φάσεις:

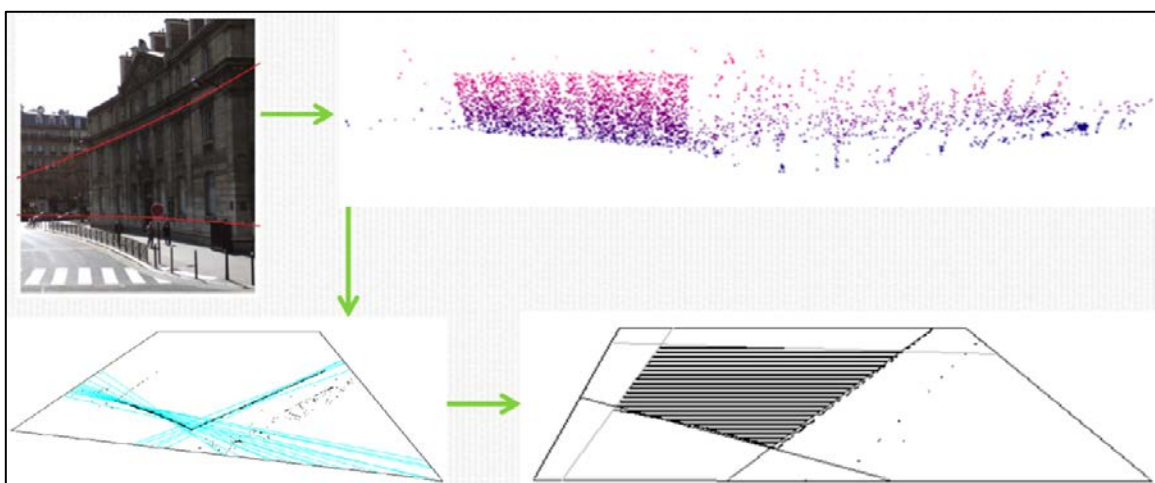
1. Τα σημεία ανατίθενται στον πιο κοντινό “k”.
2. Βρίσκεται το καινούργιο κέντρο βάρους κάθε συστάδας.
3. Γίνεται νέα ανάθεση στον πιο κοντινό “k” μέχρι να σταματήσει να μετακινείται το κέντρο βάρους.



Εικόνα 1.7: Παράδειγμα αλγορίθμου k - means.

Στη συνέχεια με την συμβολή του Ransac σε αυτό το στάδιο απορρίπτονται οι χονδροειδείς αποκλίσεις και γίνεται προσαρμογή του μοντέλου.

Τα πειράματα έγιναν σε δύο προσόψεις κτιρίων στο Παρίσι με διαφορετική αρχιτεκτονική και πυκνότητα σημείων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί κανείς να εκτιμήσει αξιόπιστα τα αποτελέσματα για τις βασικές γραμμές των προσόψεων των κτιρίων . Ο κλασικός μετασχηματισμός Hough παρείχε πολλές 2D γραμμές. Ωστόσο, με την χρήση της προτεινόμενης προσέγγισης που βασίζεται σε ταξινόμηση k -means, εξήχθησαν οι σωστές και ακριβείς 2D γραμμές. Η εξαγωγή του αποτυπώματος του κτιρίου ήταν πιο ακριβής με χρήση της μεθόδου RANSAC.



Εικόνα 1. 8: Στάδια ανακατασκευής γραμμών α) Περιοχή Ενδιαφέροντος β) Αραιό νέφος γ) Hough δ) K -Means, Ransac.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στο γρήγορο φιλτράρισμα των δεδομένων και σε τεχνικές εξαγωγής χαρακτηριστικών όπως αυτές περιγράφηκαν, και φάνηκε να λειτουργεί για μικρό όγκο δεδομένων. Θα μπορούσε να αξιολογηθεί σε επόμενη μελέτη με μεγαλύτερη περιοχή ενδιαφέροντος και πιο σύνθετα σχήματα κτιρίων. Το πρόβλημα που δεν μπορεί να λύσει η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι η εξαγωγή σημείων κτιρίων σε περιοχές τις οποίες τα οχήματα δεν μπορούν για διάφορους λόγους να προσεγγίσουν.

1.5. Εντοπισμός κτιρίων με χρήση του αλγορίθμου Ransac

Πρόσφατα πραγματοποιήθηκε μια έρευνα από τους Bool et al. (2018) η οποία είναι άξια αναφοράς εδώ γιατί γίνεται αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου Ransac, ο οποίος ως αλγόριθμος χρήσιμος στην εξαγωγή επιφανειών χρησιμοποιείται σε αρκετές προσεγγίσεις.

Στην έρευνα αυτή γίνεται καταγραφή των κτιρίων και των χαρακτηριστικών μιας περιοχής μελέτης, με την ανάπτυξη μίας εφαρμογής σε προγραμματιστικό περιβάλλον Python με την αξιοποίηση του αλγορίθμου Ransac. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι προ-ταξινομημένα.

Η μελέτη αυτή προσανατολίζεται κυρίως στα εξής στάδια μελέτης:

1. Τον εντοπισμό επιφανειών και κτιρίων.
2. Την εξαγωγή της πληροφορίας με μορφή Shapefile.
3. Τη σύγκριση του ShapeFile με ένα συγκεκριμένο πρότυπο.

Στο εισαγωγικό κομμάτι του άρθρου αναφέρονται τα πιο σημαντικά ζητήματα που καλούνται να διαχειριστούν όσοι ασχολούνται με την εξαγωγή κτιρίων από νέφη σημείων που προκύπτουν από τη συλλογή στοιχείων με LIDAR. Το ένα είναι η διαχείριση δεδομένων μεγάλου όγκου (big data management) και το δεύτερο ο εντοπισμός των κτιρίων μικρότερου μεγέθους.

Έτσι, αναλύεται αλγόριθμος RANSAC (Random Sample Consensus), οι αρχές λειτουργίας του, καθώς και το σύνολο των εντολών που απαρτίζουν τον κώδικα

ανάπτυξης του. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου, σημειώνεται ότι μερικές φορές δίνει εσφαλμένα αποτελέσματα γιατί χρησιμοποιεί μια καθαρά μαθηματική αρχή για την ανίχνευση της στέγης κτιρίων. Έτσι αναζητεί τις καλύτερες επιφάνειες χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ιδιαιτερότητα του εκάστοτε αντικειμένου.

Στην συνέχεια αναλύονται κάποιες προσθήκες στον αλγόριθμο που επιτρέπουν την εναρμόνιση του μαθηματικού μοντέλου με τη γεωμετρία των στεγών. Αυτό συμπεριλαμβάνει στάδια όπως η βελτίωση του αρχικού υποβάθρου με την μετατροπή από DSM σε 3D νέφη σημείων, η χρήση χαμηλοπερατών φίλτρων με στόχο την απαλοιφή του θορύβου. Η δεύτερη βελτίωση του αλγορίθμου ήταν η προσαρμογή του ώστε να ανιχνεύει την καλύτερη στέγη κτιρίου αντί απλώς να βρίσκει το καλύτερο μαθηματικό μοντέλο.

Φαίνεται από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε 2 δύο δείγματα 11 κτιρίων σε πόλη Φινλανδίας και 16 κτιρίων στο Στρασβούργο ότι αυτή η προσέγγιση παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα (από 70% έως κάτι παραπάνω από 95%), ακόμα και στην περίπτωση όπου η δειγματοληψία των σημείων έχει γίνει αραιά και τα κτίρια έχουν διαφορές μεταξύ τους.

Επιπλέον, περιγράφονται και αναλύονται οι σχέσεις γειτνίασης των γειτονικών επιφανειών στέγης προκειμένου να ανιχνεύονται με επιτυχία. Τέλος, πραγματοποιείται αυτόματη μοντελοποίηση με διόρθωση των σφαλμάτων που έχουν προκύψει με τη MET (Μέθοδο Ελαχίστων Τετραγώνων).

Στη συνέχεια, οι συγγραφείς εξηγούν τις βασικές αρχές του Ransac. Ο αλγόριθμος εντοπίζει τις βέλτιστες επίπεδες επιφάνειες διαλέγοντας 3 τυχαία σημεία, κατασκευάζει την επιφάνεια που αντιστοιχεί σε αυτά και στη συνέχεια εντοπίζει όλα τα σημεία που βρίσκονται πάνω σε αυτή με κατώφλι που έχει προκαθοριστεί σύμφωνα με την επιφάνεια που επιθυμεί να εξαγάγει ο χρήστης.

Επίσης, επειδή ακριβώς το άρθρο συμπεριλαμβάνει την εξαγωγή αρχείων shapefile, περιγράφονται εισαγωγικά οι βασικές αρχές μίας βιβλιοθήκης σε προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας Python με σκοπό τη διαχείριση αρχείων LAS από LIDAR.

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθείται αποτελείται από τρία στάδια:

1. Αποκοπή των αρχείων LAS.
2. Εντοπισμός των επιφανειών με Ransac.
3. Εντοπισμός των στεγών των κτιρίων.

Η αποκοπή των αρχείων LAS για την περιοχή ενδιαφέροντος πραγματοποιήθηκε με έτοιμα λογισμικά επεξεργασίας νέφους σημείων (Bentley Microstation για την ταξινόμηση και CloudCompare για την αποκοπή).

Για τον εντοπισμό των επιπέδων γίνεται ανάλυση του αλγορίθμου Ransac. Ως «input» χρησιμοποιούνται τα αρχεία LAS τα οποία μετατρέπονται πρώτα σε αρχείο «CSV» ή «ASCII». Το πρόγραμμα επιλέγει τρία τυχαία σημεία από αυτά που έχουν εισαχθεί και δημιουργεί μια επιφάνεια με την κανονική μορφή της εξίσωσης της επιφάνειας $\rho = X \times \cos\theta \times \cos\varphi + Y \times \sin\theta \times \cos\varphi + Z \times \sin\varphi$.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η απόσταση κάθε άλλου σημείου από την επιφάνεια με την εξίσωση της απόστασης $D(X, Y, Z) = X \times \cos\theta \times \cos\varphi + Y \times \sin\theta \times \cos\varphi + Z \times \sin\varphi - \rho$, με “θ”, “φ” και “ρ” τις σταθερές παραμέτρους της εξίσωσης και “X”, “Y”, “Z” τις συντεταγμένες των σημείων. Αφού υπολογιστούν οι αποστάσεις, το πρόγραμμα ελέγχει πόσα σημεία δεν υπερβαίνουν ένα συγκεκριμένο όριο στην απόσταση (κατώφλι “t”). Αν τα σημεία που δεν το υπερβαίνουν είναι λιγότερα από όσα έχουν οριστεί για να είναι αποδεκτή η επιφάνεια (δηλαδή “s”), η επιφάνεια αποθηκεύεται.

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται N φορές ώστε να καθοριστεί η καταλληλότερη επιφάνεια με τα περισσότερα σημεία. Ο αριθμός των επαναλήψεων δίνεται από τον τύπο:

$$N = \frac{\log(1-a)}{\log(1-(1-\varepsilon)^5)}$$

Τέλος, γίνεται φιλτράρισμα για τα σημεία που βρίσκονται στην επίπεδη επιφάνεια αλλά σημαντικά μακριά από τα υπόλοιπα σημεία. Για να φιλτράρει το σύνολο των σημείων, το πρόγραμμα επιλέγει ένα σημείο και δημιουργεί μια ζώνη σε απόσταση που καθορίζεται από το χρήστη.

```

Plane Extraction (1-14) are from Tarsha-Kurdi
1. bestSupport = 0; bestPlane(3,1) = [0, 0, 0]; ~bestPoints(n,4) = [[0,0,0,0],...,[n,n,n,n]]
2. bestStd = 8; i = 0
3. e = 1 - foreseeable_support/length(point_list)
4. N = round (log (1 - a)/log (1 - (1 - e) ^3))
5. while (i < N):
6.   j = pick 3 points randomly among (point_list)
7.   pl = pts2plane(j)
8.   dis = dist2plan(pl, point_list)
9.   s = find(abs(dis)<= t)
10.  st = Standard_deviation (s)
11.  if (length(s) > bestSupport or (length(s) = bestSupport and st < bestStd)) then
12.    bestSupport = length (s); ~bestPoints = points_within_t
13.    bestPlan = pl; bestStd = st; endif
14.  i = i+1; endwhile
15. bestPoints(bestSupport,4) = filter(bestPoints,max_dist)
16. exportPoints(bestPoints)
17. point_list = deletePoints(bestPoints from point_list)
18. Restart from 1 while length(point_list) > 0

```

Εικόνα 1. 9: Ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό των επιπέδων.

Ο εντοπισμός των οροφών των κτιρίων πραγματοποιείται με την λογική του εντοπισμού των υψηλότερων σημείων που υπάρχουν και στη συνέχεια ελέγχεται πόσα σημεία βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του κτιρίου.

Αν ο αριθμός των σημείων μέσα στο ανιχνευθέν κτίριο είναι λιγότερο από έναν καθορισμένο αριθμό σημείων, το πρόγραμμα δεν θα το εκτιμήσει ως ένα ενιαίο κτίριο.

```

Building Detection
0.* N = minimum_pts_for_bldg
1. count = count(planes)
2. files_connected = []
3. i = 0
4. while i < count:
5.     j = 0
6.     main_plane = planes[i]
7.     while j != count and i not in files_connected:
8.         if j not in files_connected:
9.             do_connect = isConnected(main_plane,planes[j])
10.            if do_connect == True:
11.                main_plane = connectPlanes(main_plane,planes[j])
12.                files_connected += j
13.                j = 0
14.            else:
15.                j += 1
16.        else:
17.            j += 1
18.    if len(main_plane) >= N:
19.        exportAsBldg(main_plane)

```

Εικόνα 1.10: Ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό των κτιρίων.

Ακολούθως, δημιουργείται ένα αρχείο shapefile, αφού τα σημεία των κτιρίων που εντοπίστηκαν εισαχθούν σε περιβάλλον ArcGIS με το εργαλείο AggregatePoints. Το αρχείο αυτό συγκρίνεται με το αντίστοιχο το οποίο έχει ψηφιοποιηθεί από το DSM και την ορθοφωτογραφία ώστε να καθοριστούν οι ομοιότητές τους.

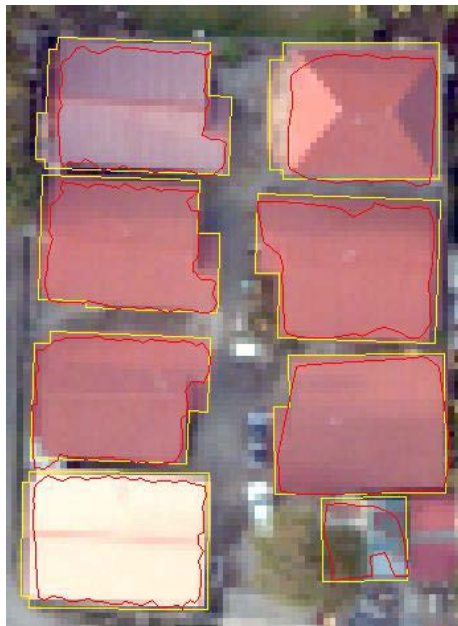
Τα αποτελέσματα του πειράματος προκύπτουν με τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων και περιορισμών που χρειάζονται να αρχικοποιηθούν για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος.

Είναι τα ελάχιστα σημεία που χρειάζονται έτσι ώστε να δύναται να εντοπιστεί μια επιφάνεια, τα οποία καθορίζονται βάσει της πυκνότητας και της περιοχής που καλύπτει η επιφάνεια. Μετά από διάφορα τεστ, η μέγιστη απόσταση σημείου και επιφάνειας ορίστηκε στα 0.1 m και η μέγιστη απόσταση των σημείων μεταξύ τους στα 0.5 m. Τέλος, η ελάχιστη πιθανότητα να εντοπιστεί ένα σετ παρατηρήσεων που καλύπτει τις απαιτήσεις που υπάρχουν ορίστηκε στο 90%.

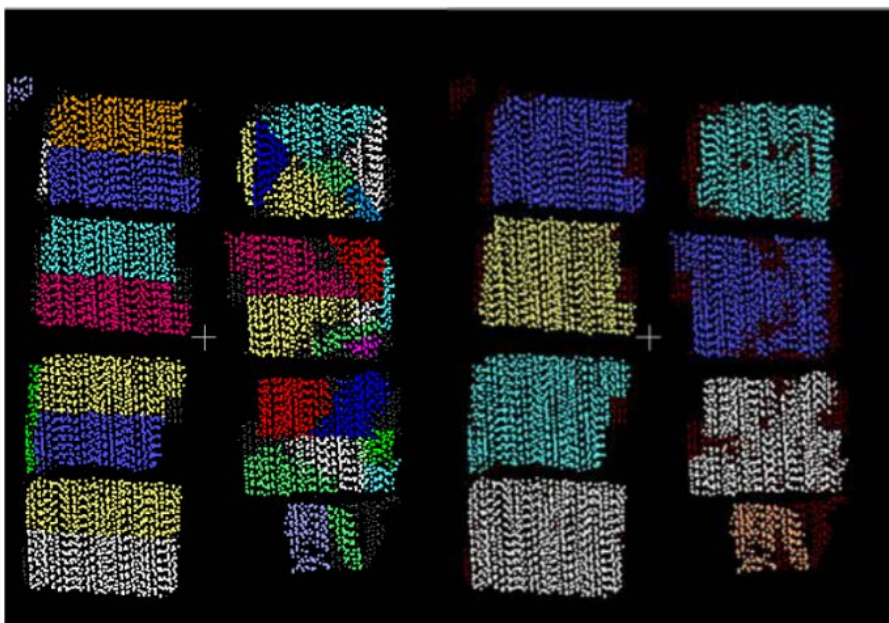
Η περιοχή που εξετάστηκε βρίσκεται στις Φιλιππίνες, έχει έκταση 1.083,63 m² και περιλαμβάνει 9 κτίρια. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από LIDAR, 9092 σημεία συνολικά, με ευαισθησία στου αισθητήρα 8.41 σημεία ανά m². Το πρόγραμμα “έτρεξε” συνολικά για περίπου 5 ώρες. Από τα 9092 σημεία τα 7896

συμπεριλήφθηκαν στα τελικά αποτελέσματα. Η πυκνότητα σημείων ανά m^2 ήταν κατά μέσο όρο 8 σημεία. Για 24 επιφάνειες, το πρόγραμμα εντόπισε 33 επιφάνειες, ενώ εντοπίστηκαν τα 8 από τα 9 κτίρια.

Οι διαφορές μεταξύ των shapefile οι οποίες ορίζονται ως τυπική απόκλιση, που προκύπτει από την σύγκριση των m^2 των 8 κτιρίων που εντοπίστηκαν, κυμαίνονται από 7.92 % έως 31.26 %.



Εικόνα 1.11: Δημιουργούμενα και ψηφιοποιημένα Shapefiles.



Εικόνα 1. 12: Εντοπισμένες Επιφάνειες και Κτίρια.

Για τα συμπεράσματα, οι συγγραφείς του άρθρου λαμβάνουν υπ' όψη τους περιορισμούς οι οποίοι επηρέασαν τα αποτελέσματα οι οποίοι αναφέρθηκαν παραπάνω:

1. Τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σημεία, ενώ θα μπορούσαν να είναι επιφάνειες, έτσι ώστε οι υπολογισμοί που πραγματοποιεί το πρόγραμμα να είναι λιγότερο απαιτητικοί και χρονοβόροι.
2. Η υπολογιστική ισχύς του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν αρκετή για τον όγκο δεδομένων, γεγονός που σημαίνει ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με αργούς ρυθμούς, ενώ δημιουργούνται μελλοντικοί περιορισμοί στην εκτέλεση του προγράμματος για μεγαλύτερο όγκο δεδομένων.
3. Οι στέγες των περισσότερων κτιρίων ήταν πολυεπίπεδες, είχαν δηλαδή σοφίτες. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχει δυσκολία στον εντοπισμό των κτιρίων καθώς ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα υψηλότερα σημεία, ενώ μπορεί να υπάρχουν και χαμηλότερα τα οποία αντιστοιχούν στις οροφές των κτιρίων.
4. Τέλος, οι παράμετροι του αλγορίθμου έχουν επιλεγεί για την ανάλυση και την πυκνότητα των συγκεκριμένων δεδομένων, και σημειώνεται πως για άλλα δεδομένα Lidar μπορεί να μην ανταποκρίνονταν οι συγκεκριμένοι παράμετροι.

Αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να εξάγονται σε επιφάνειες, με σκοπό να μπορούν να οπτικοποιηθούν καλύτερα σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον, όπως το Google Earth Features. Για την δημιουργία shapefile, χρειάζεται να απομονωθούν τα όρια κάθε κτιρίου ξεχωριστά, έτσι είναι μια διαδικασία που ο αλγόριθμος δεν εξασφαλίζει αποτέλεσμα ενιαία για όλη την περιοχή ενδιαφέροντος.

Επιπλέον, τονίζεται ότι θα μπορούσε να βελτιωθεί η παραμετροποίηση στο στάδιο του φιλτραρίσματος των σημείων για να είναι λειτουργικό για διαφορετικά είδη δεδομένων. Η συσσωμάτωση σημείων σε shapefile θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί σαν διαδικασία σε περιβάλλον GIS, με τη χρήση της βιβλιοθήκης ArcPy ή με τη συνδρομή της επέκτασης ModelBuilder.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη CGAL για την ανάπτυξη του προγράμματος. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη είναι ένα πρόγραμμα λογισμικού που

παρέχει εύκολη πρόσβαση σε αποδοτικούς και αξιόπιστους γεωμετρικούς αλγόριθμους. Εφαρμόζεται σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, στον κλάδο της Μοριακής Βιολογίας, της Ρομποτικής κ.ά. Οι συγγραφείς προτείνουν να δοκιμαστεί ο αλγόριθμος και σε διαφορετικές πλατφόρμες για να μπορούν να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις.

2. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΕΚΜΑΘΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ

2.1. Βασικές αρχές

Τα τελευταία χρόνια το πιο σύγχρονο πεδίο για την αυτόματη εξαγωγή πληροφορίας από νέφη σημείων είναι το επιστημονικό πεδίο της εκμάθησης μηχανής και των νευρωνικών δικτύων.

Η εκμάθηση μηχανής υπάγεται στην επιστήμη των υπολογιστών και συγκεκριμένα στο πεδίο που αφορά αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και στατιστικά μοντέλα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να κάνουν “προβλέψεις” βάση δεδομένων εμπειρικών και δεδομένων “εκπαίδευσης”.

Ουσιαστικά, σύμφωνα με τον Goodfellow (2016), αφορά μια μορφή εφαρμοσμένων στατιστικών στοιχείων με αυξημένη έμφαση στη χρήση των υπολογιστών, έτσι ώστε να εκτιμηθούν με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης σύνθετες λειτουργίες σε συνδυασμό με τα διαστήματα εμπιστοσύνης γύρω από αυτές τις λειτουργίες.

Ένας αλγόριθμος εκμάθησης μηχανής είναι ο αλγόριθμος που μπορεί να «μάθει» από τα δεδομένα. Ο Mitchell (1997) αναφέρει για τη διαδικασία εκμάθησης πως «Ένα πρόγραμμα υπολογιστή λέγεται ότι μαθαίνει από εμπειρία E ως προς μια κλάση εργασιών T και ένα μέτρο επίδοσης P , αν η επίδοσή του σε εργασίες της κλάσης T , όπως αποτιμάται από το μέτρο P , βελτιώνεται με την εμπειρία E ». Ο όρος Βαθεία Εκμάθηση (Deep Learning) μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του όρου Μάθηση Μηχανής όταν οι αλγόριθμοι και τα μοντέλα που εφαρμόζονται διαθέτουν πλέον μεγάλη συνθετότητα.

Η εκμάθηση μηχανής επιτρέπει την εκπόνηση δύσκολων εργασιών οι οποίες δεν μπορούν να περατωθούν με πρωτογενή προγράμματα που έχουν σχεδιαστεί από ανθρώπους. Η διαδικασία της εκμάθησης δεν αποτελεί από μόνη της την κλάση εργασιών T , η οποία αναφέρθηκε παραπάνω. Μάθηση είναι τα μέσα εκείνα που αξιοποιούνται για να επιτευχθεί η ικανότητα εκτέλεσης αυτών των εργασιών.

Οι εργασίες αυτές ποικίλλουν ανάλογα με το προς επίλυση πρόβλημα. Τρεις βασικές κατηγορίες είναι η ανάλυση παλινδρόμησης, η ταξινόμηση και η διακριτοποίηση. Στην ανάλυση παλινδρόμησης, η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών εκτιμάται μέσω της εύρεσης μιας συνάρτησης $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ που ταιριάζει στα γνωστά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκμάθηση. Στην κατηγορία της ταξινόμησης αναζητείται μια συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \{1, \dots, k\}$, όπου το σύνολο τιμών αντιπροσωπεύει ένα σύνολο τάξεων. Αντίστοιχα, στα προβλήματα διακριτοποίησης το ζητούμενο είναι η εύρεση μίας συνάρτησης $f: \mathbb{R}^n \times n \rightarrow \{1, \dots, k\}$ n. Τα προβλήματα διακριτοποίησης είναι παρόμοια με τα προβλήματα ταξινόμησης, αφού γίνεται ταξινόμηση κάθε στοιχείου που ανήκει στο σύνολο εισόδου.

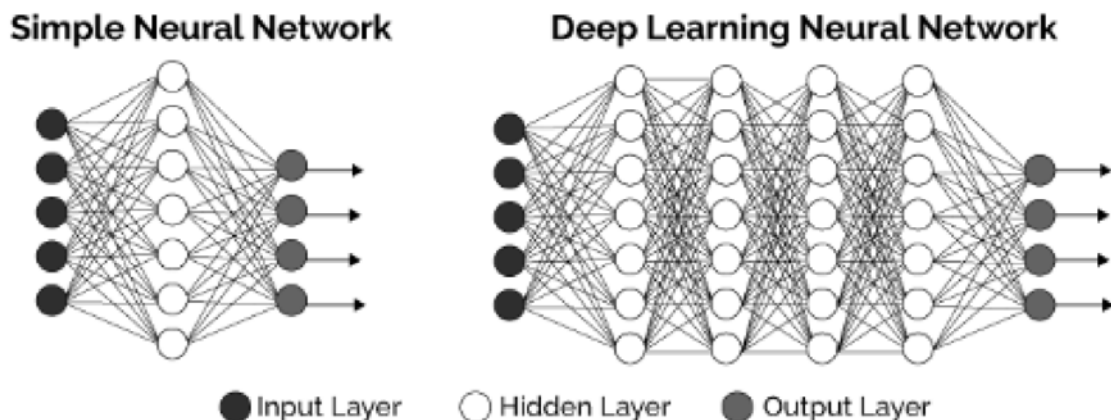
Το μέτρο επίδοσης συνδέεται άμεσα με τις εργασίες που πρέπει να εκτελεστούν. Για παράδειγμα, σε προβλήματα ταξινόμησης συνήθως το μέτρο που χρησιμοποιείται είναι η ακρίβεια του μοντέλου. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί το ποσοστό σφάλματος. Συνήθως βαθμολογείται στην κλίμακα 0 – 1, με την μικρότερη μηδενική τιμή να σημαίνει ότι η ταξινόμηση έχει πραγματοποιηθεί σωστά και τη μεγαλύτερη μοναδιαία τιμή ότι όχι.

Σύμφωνα με την εμπειρία E που τους επιτρέπεται να λάβουν κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης, οι αλγόριθμοι εκμάθησης μηχανής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες. Οι κατηγορίες αυτές είναι η εποπτευόμενη μάθηση (supervised learning), η μάθηση χωρίς επιτήρηση (unsupervised learning) και η μάθηση μέσω ενίσχυσης (reinforcement learning). Το σύνολο δεδομένων και τα χαρακτηριστικά παίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στη χρήση της εκμάθησης μηχανής, επειδή αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στην ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων εισόδου.

Η μάθηση χωρίς επιτήρηση είναι μια κατηγορία προβλημάτων στην οποία κάποιος επιδιώκει να καθορίσει τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται τα δεδομένα. Ο στόχος των αλγορίθμων αυτών είναι η αναγνώριση μοτίβων και δομής στα δεδομένα αυτά. Οι τεχνικές αυτές είναι λιγότερο δημοφιλείς, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν σε λίγες περιπτώσεις. Στην εποπτευόμενη μάθηση, τα δεδομένα εκπαίδευσης τροφοδοτούνται με «ετικέτα» για να εκπαιδεύσουν τον υπολογιστή να εκτελεί σωστά μια εργασία (Barrille, 2019). Στόχος είναι να βρεθεί μία συνάρτηση η οποία

αντιστοιχίζει την τιμή εισόδου με μία πρόβλεψη μέσω της ελαχιστοποίησης του σφάλματος στις τιμές του συνόλου αυτού. Η μάθηση μέσω ενίσχυσης, αφορά αλγόριθμους που εκπαιδεύουν τα δεδομένα δυναμικά με τη δοκιμή διάφορων ενεργειών, ανάλογα με τους στόχους που τίθενται σε κάθε περίπτωση.

Μοντέλα μηχανικής μάθησης εμπνευσμένα από την λειτουργία των βιολογικών εγκεφάλων είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) (ANN, Artificial Neural Network). Αποτελούνται από υπολογιστικές μονάδες οι οποίες ονομάζονται κόμβοι (nodes) ή νευρώνες (neurons). Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου (I, N, O, E) αποτελείται από ένα σύνολο I θέσεων εισόδου, ένα σύνολο N υπολογιστικών μονάδων, ένα σύνολο O θέσεων εξόδου και ένα σύνολο E σταθμισμένων και προσανατολισμένων ακμών. Οι ακμές έχουν τη μορφή διανύσματος (u, v, w) , όπου $u \in I \cup N$, $v \in N \cup O$, και $w \in \mathbb{R}$ το βάρος της κάθε ακμής. Ένα ANN με πολλαπλά στρώματα μεταξύ της εισόδου και της εξόδου ονομάζεται βαθύ νευρωνικό δίκτυο (deep neural network).



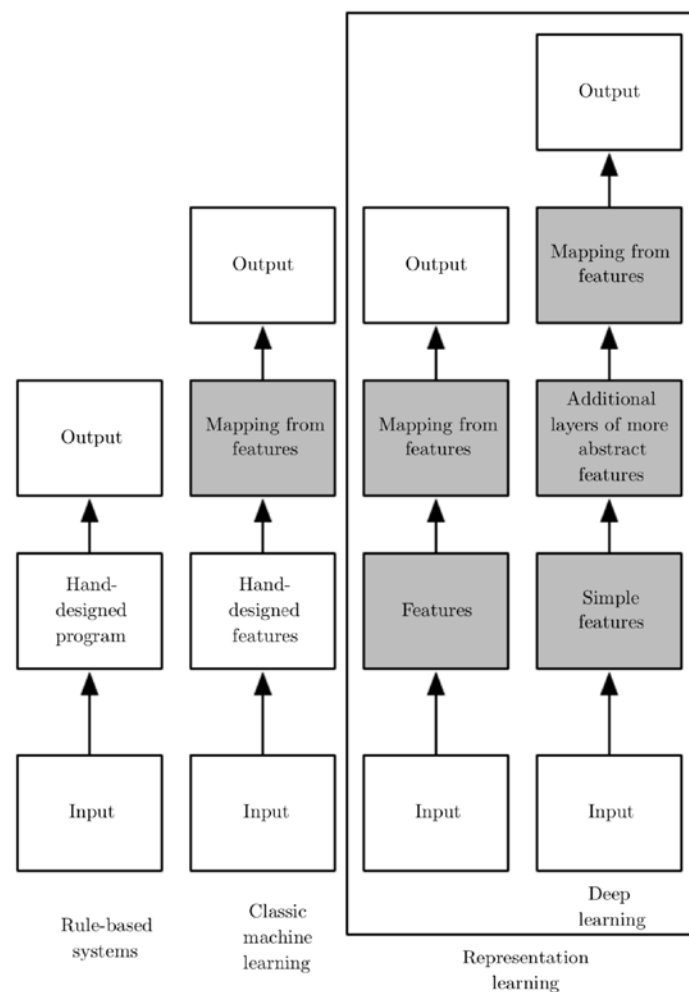
Εικόνα 2.1: Απλά και Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα (Goodfellow, 2016).

2.2. Ανασκόπηση μεθόδων

Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις στην επιστημονική κοινότητα για την ταξινόμηση τρισδιάστατων δεδομένων με μεθόδους Τεχνητής Νοημοσύνης.

Αυτές κατηγοριοποιούνται σε μεθόδους που βασίζονται σε καθορισμένους κανόνες, σε κλασικές μεθόδους εκμάθησης μηχανής (Machine Learning, ML), σε μεθόδους αναπαράστασης μάθησης (Representation Learning, RL) και σε μεθόδους

αναπαράστασης μάθησης με Βαθεία Μάθηση (Deep Learning, DL). Περισσότερες πληροφορίες για τις τέσσερις αυτές κατηγορίες μπορεί κάποιος να βρει στο άρθρο του LeCun (2015), ο οποίος κάνει ανασκόπηση σε μια σειρά άρθρα που αφορούν τις μεθόδους αυτές, ενώ πιο αναλυτικά ο I. Goodfellow στο βιβλίο του που προαναφέρθηκε αναλύει τις μεθόδους Βαθείας Μάθησης και άλλα χρήσιμα στοιχεία.



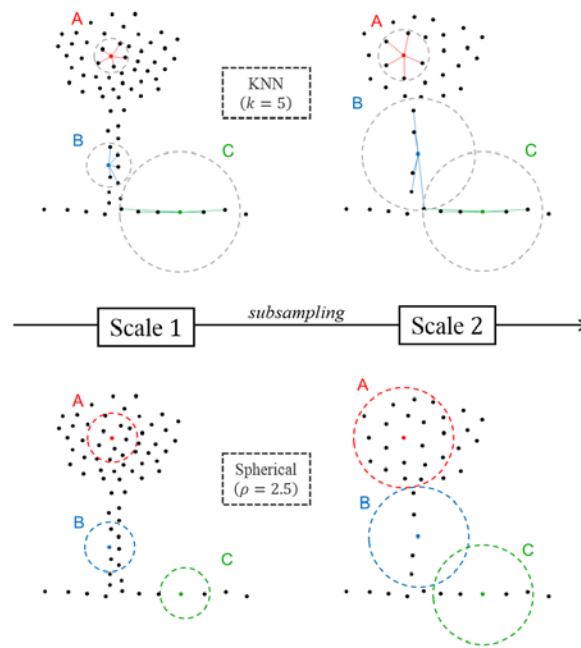
Εικόνα 2.2: Μεθοδολογία μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης (Goodfellow, 2016).

Οι τεχνικές ML και DL είναι κυρίως αυτές που έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα στην ταξινόμηση νεφών σημείων και ο κάθε εμπλεκόμενος εστιάζει σε διαφορετικές λεπτομέρειες. Ο Weinmann (2013) εξέτασε τη σημασία των χαρακτηριστικών των σημείων για κλάση εργασιών ταξινόμησης σημείων που έχουν προκύψει από Επίγειο Σαρωτή Laser, ενώ δύο χρόνια μετά (Weinman, 2015) ανέπτυξε μια μέθοδο ταξινόμησης με ML για την ερμηνεία των ιδανικότερων γειτονικών σημείων και των σχετικών τους χαρακτηριστικών. Ο Dohan (2015)

ανέπτυξε έναν αλγόριθμο εποπτευόμενης μάθησης για την ιεραρχική κατάτμηση ενός νέφους σημείων για μια αστική περιοχή της Ν. Υόρκης.

Στην ίδια λογική με τους προηγούμενους, ο Hackel (2016) παρουσιάζει μια μέθοδο η οποία εξετάζει πιο λεπτομερώς τις γειτονικές – γεωμετρικές σχέσεις που πρέπει να υπολογιστούν μεταξύ των σημείων σε διαφορετικές κλίμακες, μειώνοντας όμως την πυκνότητα του νέφους και ελαφρύνοντας τους υπολογισμούς. Σε μια παρόμοια προσπάθεια, επιχειρεί την ίδια χρονιά (Hackel, 2016) να αναπαραστήσει το νέφος σημείων με ένα μοντέλο με ισοϋψείς, έτσι ώστε να απλοποιήσει τους γεωμετρικούς υπολογισμούς.

Ο Thomas (2018) κινείται στην ίδια κατεύθυνση και προσπαθεί να αναπτύξει τις παραπάνω τεχνικές. Ενώ οι πλειοψηφία των προηγούμενων μελετητών αξιοποιεί τον αλγόριθμο K-Means σε συνδυασμό με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα, ο ίδιος περιορίζει την ταξινόμηση των σημείων στο χώρο σε σφαίρες με γνωστή ακτίνα, με αποτέλεσμα να πετυχαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, δεν περιορίζεται στον υπολογισμό και την εξαγωγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών του νέφους όπως οι προηγούμενοι (π.χ. επιπεδότητα, σφαιρικότητα, αλλαγή κλίσης, καθετότητα, γραμμικότητα κ.λπ.). Υπολογίζει στοιχεία που αφορά τα χρώματα των σημείων (μέσος όρος, διακύμανση απόχρωσης).



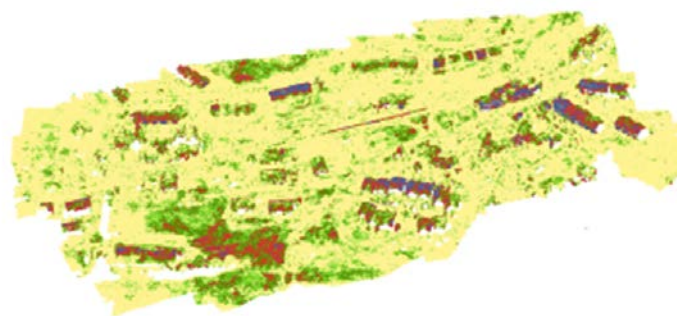
Εικόνα 2.3: Σύγκριση K Means με ταξινόμηση σε σφαίρες (Thomas, 2018).

Στην ίδια κατεύθυνση κινείται και ο Becker (2017), ο οποίος για να εκπαιδεύσει το δίκτυο χρησιμοποιεί τα χρώματα των σημείων και των γειτόνων τους, με ποιοτική και ποσοτική βελτίωση όσον αφορά στον εντοπισμό των επιμέρους κλάσεων και ιδιαίτερα των κτιρίων.

Cadastre dataset

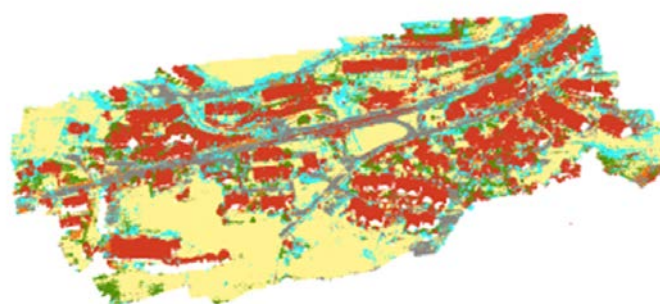


Εικόνα 2.4: Τα πρωτογενή δεδομένα (Becker, 2017).



(b) Classification with geometry features only.

Εικόνα 2.5: Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά μόνο (Becker, 2017).

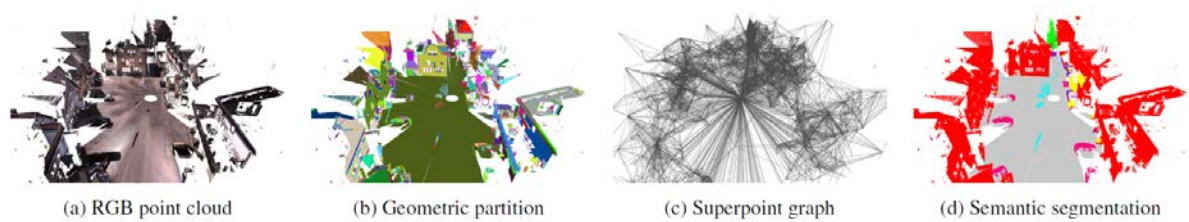


(c) Classification with geometry + color features.

Εικόνα 2.6: : Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά και χρώμα (Becker, 2017).

Αν ληφθούν υπόψη τα πλεονεκτήματα της DL και η εξέλιξη που υπάρχει τα τελευταία χρόνια, αυτές οι μέθοδοι κατατάσσονται στις πιο σύγχρονες και υποσχόμενες. Ο Wu (2015) προτείνει την αναπαράσταση τρισδιάστατων σχημάτων ως μια κατανομή πιθανοτήτων δυαδικών μεταβλητών πάνω σε τρισδιάστατο κάναβο, με τη χρήση ενός Συνελικτικού Νευρωνικού Δικτύου (ΣΝΔ) (Convolutional Neural Networks, CNNs). Ο Qi (2017) σχεδίασε ένα Δίκτυο (PointNet++), το οποίο εκπαιδεύεται σε έναν καθορισμένο μετρικό χώρο.

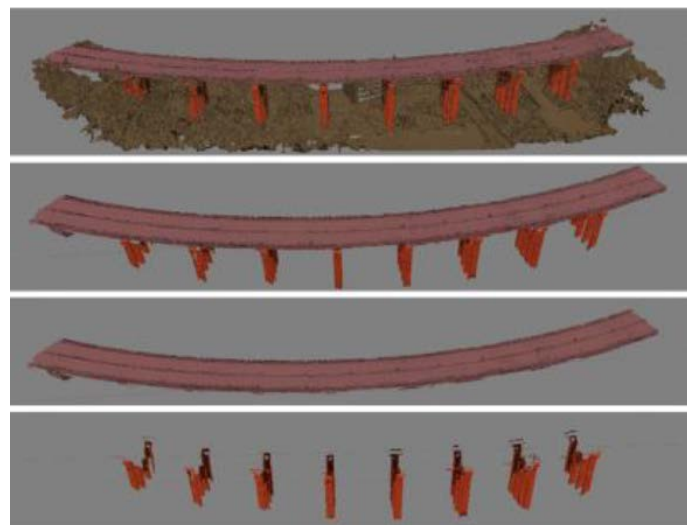
Οι Landrieu & Simonovsky (2018) προτείνουν την αναπαράσταση του νέφους σημείων ως ένα γράφημα κόμβων (superpoints) και ακμών (superedges) που αναφέρεται ως Superpoint Graph, και είναι πιο απλό από το νέφος, με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί να πραγματοποιούνται πιο εύκολα. Το Επαναλαμβανόμενο Νευρωνικό Δίκτυο (ΕΝΔ) (Recurrent Neural Network, RNN) που σχεδίασε ο Yousefhussien (2018) «μαθαίνει» τη γεωμετρία του νέφους αποκλειστικά από τις συντεταγμένες των σημείων.



Εικόνα 2.7: Ταξινόμηση με superpoints και superedges. (Landrieu, Simonovsky, 2018)

Σε κάποιες άλλες πρόσφατες μελέτες, ερευνητές επιχείρησαν να βελτιώσουν το αποτέλεσμα της ταξινόμησης χρησιμοποιώντας μάσκες από δισδιάστατες εικόνες. Ο Remondino (2018) με μία ημιαυτόματη προσέγγιση, εντοπίζει τις κατηγορίες της βλάστησης με τη χρήση μάσκας σε ορθοφωτογραφία, και τις διαχωρίζει από το υπόλοιπο νέφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το Δίκτυο που χρησιμοποιεί στη συνέχεια να έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα στον εντοπισμό των κτιρίων. Ο ίδιος, ένα χρόνο μετά Remondino (2019), με την ίδια λογική, αξιοποιεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) για να βελτιώσει την ακρίβεια εξαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του νέφους.

Τέλος, ο Baririle (2019) προτείνει αντίστοιχα ένα δίκτυο (Mask R-CNN) που εκπαιδεύεται με δισδιάστατες μάσκες, οι οποίες υπολογίζουν με γεωμετρικούς υπολογισμούς τα επιμέρους τμήματα μια γέφυρας.



Εικόνα 2.8: Αποτελέσματα ταξινόμησης με το δίκτυο Mask R-CNN (Baririle, 2019).

2.3. Τεχνικές με βιβλιοθήκες ανοιχτών δεδομένων

Το τελευταίο διάστημα αναπτύσσονται διαρκώς βιβλιοθήκες ανοιχτών και μη δεδομένων που υποστηρίζουν την ανάπτυξη αλγορίθμων που αφορούν τρισδιάστατη πληροφορία.

Μια τέτοια βιβλιοθήκη είναι η Open3D, η οποία περιέχει δομές και αλγορίθμους σε περιβάλλον Python και C ++. Χρησιμοποιείται για νέφη σημείων, πυκνά νέφη σημείων, εικόνες RGB-D, παρέχοντας αλγόριθμους εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων, δειγματοληψίας, οπτικοποίησης, μετασχηματισμού κ.λπ.

Για τα νέφη σημείων υπάρχει δομή δεδομένων που περιλαμβάνει τρία πεδία: το «Pointcloud.Points» για τις συντεταγμένες των σημείων, το “Pointcloud.Normals” για τα διανύσματα και το “Pointcloud.Colors” για τα χρώματα. Για την οπτικοποίηση του νέφους σημείων υπάρχει η λειτουργία “draw.geometrics” για την περιστροφή του νέφους, την αλλαγή κλίμακας, την καταγραφή τρέχουσας οθόνης κ.λπ.

Η βιβλιοθήκη υποστηρίζει επιπλέον την αλληλοαναφορά νεφών η οποία βασίζεται σε ICP και Ransac . Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή υποστηρίζει κώδικα που χρησιμοποιεί δεδομένα ίδιου τύπου που χρησιμοποιούν οι εικόνες RGB – D. Υπενθυμίζεται ότι μια εικόνα RGB-D είναι ένας συνδυασμός μιας εικόνας RGB και της αντίστοιχης εικόνας βάθους. Μια εικόνα βάθους είναι ένα κανάλι εικόνας στο οποίο κάθε εικονοψηφίδα σχετίζεται με μια απόσταση μεταξύ του επιπέδου εικόνας και του αντίστοιχου αντικειμένου που φαίνεται στην εικόνα RGB.

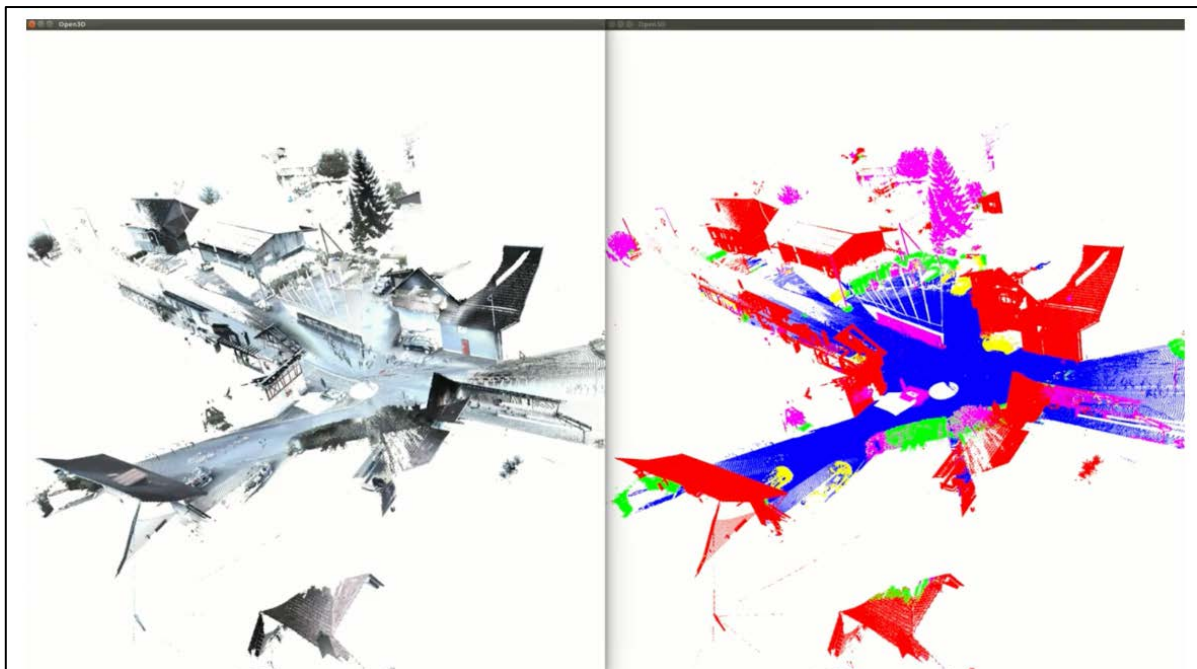
Module	Functionality
Geometry	Data structures and basic processing algorithms
Camera	Camera model and camera trajectory
Odometry	Tracking and alignment of RGB-D images
Registration	Global and local registration
Integration	Volumetric integration
I/O	Reading and writing 3D data files
Visualization	A customizable GUI for rendering 3D data with OpenGL
Utility	Helper functions such as console output, file system, and Eigen wrappers
Python	Open3D Python binding and tutorials

Εικόνα 2.9: Open 3D - Λειτουργίες (Zhou, Park, Koltun, 2018).

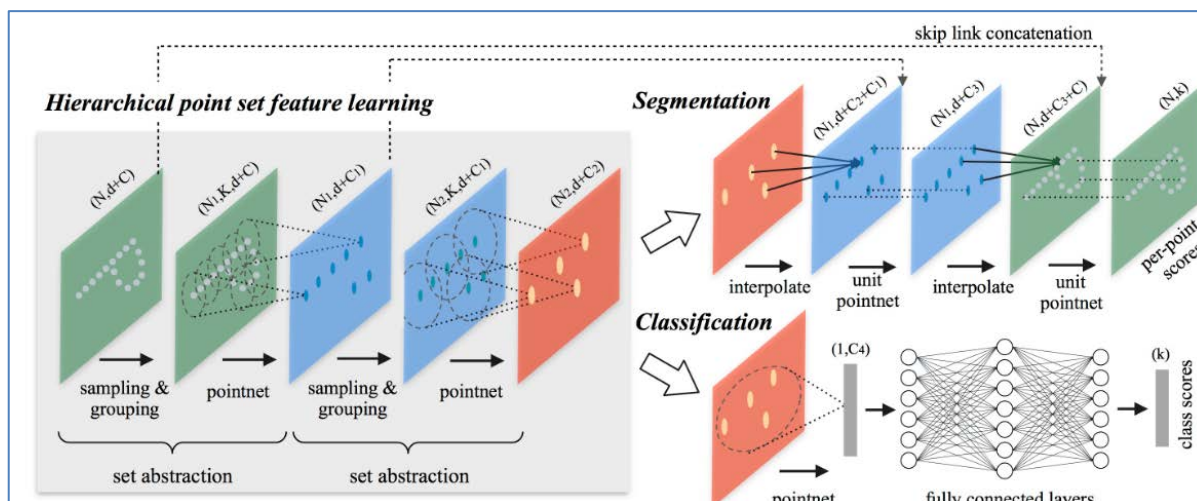
Η προαναφερθείσα βιβλιοθήκη ανοιχτών δεδομένων μπορεί να εφαρμόσει απλές λειτουργίες. Έχει όμως εφαρμογή και σε κατάτμηση και ταξινόμηση τρισδιάστατων νεφών σημείων. Χρησιμοποιούνται τεχνικές εκμάθησης μηχανής για την αναγνώριση προτύπων που αξιοποιούν τα κανονικοποιημένα σχήματα των κτιρίων τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα στη βιβλιοθήκη. Τα στάδια της κατάτμησης είναι τα εξής:

1. Προεπεξεργασία των δεδομένων.
2. Ενσωμάτωση σε μία βιβλιοθήκη (TensorFlow: προγραμματιστική πλατφόρμα της Google για τη διευκόλυνση διαδικασιών όπως ο προγραμματισμός ροής δεδομένων και η εκμάθηση μηχανής).
3. Μετεπεξεργασία δεδομένων.
4. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων.

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου βασίζεται σε νευρωνικό δίκτυο με την ονομασία PointNet ++, το οποίο έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί σε διάφορα στάδια σετ σημείων με στόχο να ολοκληρωθεί η κατάτμηση και η ταξινόμηση νεφών.



Εικόνα 2.10: Open 3D - Παράδειγμα κατάτμησης PointCloud (Zhou, Park, Koltun, 2018).



Εικόνα 2.11: PointNet++ (Qi, Yi, Su, Guibas, 2017)

2.4. Τεχνική κατάτμησης φωτογραμμετρικού νέφους

Ένα παράδειγμα όπου η εκμάθηση μηχανής και τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή κτιρίων, περιγράφεται σε έρευνα των Ozdemir & Remondino (2018).

Η μελέτη αυτή παρουσιάζει συνδυασμένες μεθόδους κατάτμησης και ταξινόμησης για τρισδιάστατα νέφη σημείων τα οποία έχουν προκύψει φωτογραμμετρικά με πυκνότητα μεγαλύτερη των 30 σημείων/ m^2 και ορθοφωτογραφιών RGB ανάλυσης 10 cm, με στόχο τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, τον εντοπισμό κτιρίων, δένδρων κ.λπ.. Η λογική είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω με σκοπό το καλύτερο αποτέλεσμα.

Χρησιμοποιώντας μία ημιαυτόματη προσέγγιση, ο αλγόριθμος εντοπίζει τις κατηγορίες βλάστησης κυρίως, αλλά και άλλες, που διαχωρίζονται από το υπόλοιπο νέφος σημείων με την εφαρμογή μάσκας. Στη συνέχεια είναι πιο εύκολο να εντοπιστούν τα κτίρια. Με αυτό τον τρόπο δεν χρειάζεται να υπάρχουν αρχικά στοιχεία για τα κτίρια που να έχουν προκύψει από επίγειες τοπογραφικές μεθόδους ή από αποτυπώματα κτιρίων.

Για την κατάτμηση του νέφους αναφέρεται στο άρθρο ότι υπάρχουν κάποιες μεθοδολογίες που την προσεγγίζουν με εκμάθηση μηχανής, όπως αυτές που

εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ άλλες την προσεγγίζουν με καθαρά γεωμετρικούς υπολογισμούς ή και συνδυασμό μεθόδων.

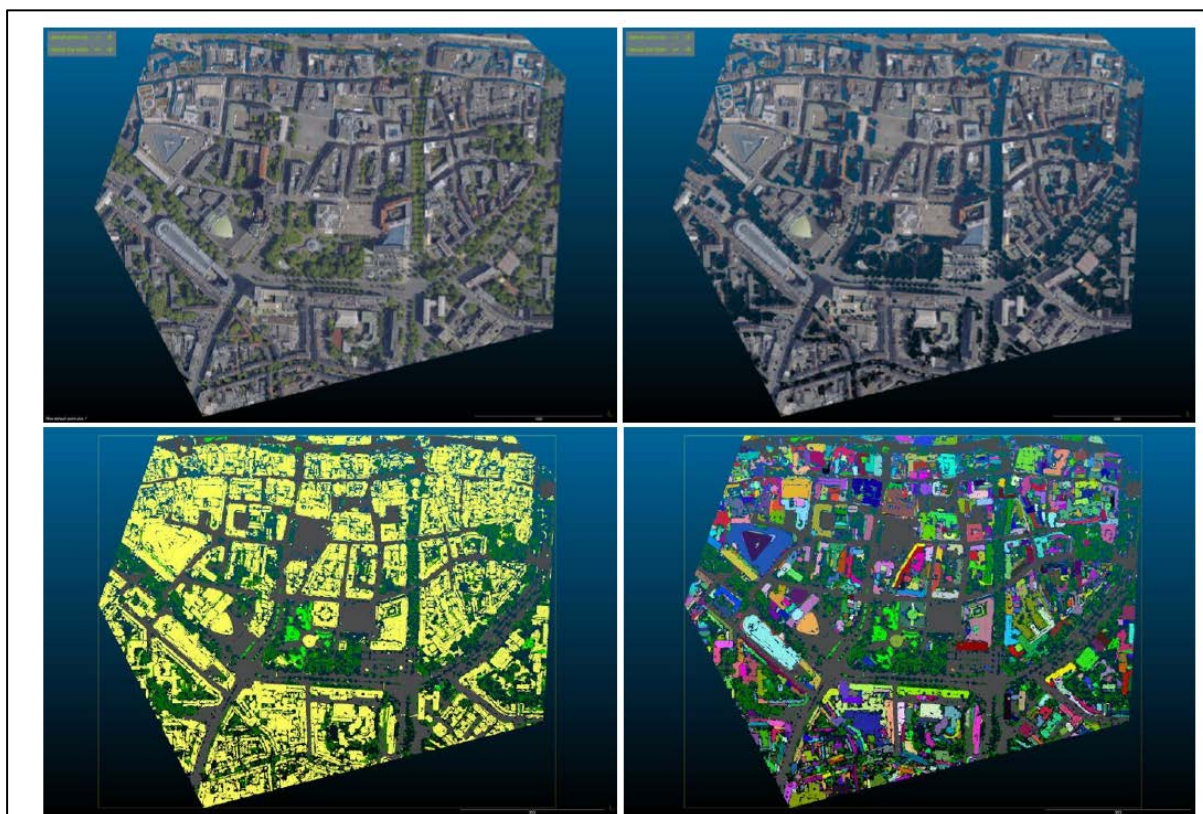
Στη μεθοδολογία που ακολουθείται περιγράφονται τα εξής στάδια:

1. Χρησιμοποιείται μάσκα στη βλάστηση με τη μέθοδο της κατάτμησης και τη χρήση ορθοφωτογραφιών.
2. Πραγματοποιείται κατάτμηση του νέφους σημείων με δεδομένα που έχουν προκύψει από την αρχική επεξεργασία και το διαχωρισμό της βλάστησης.
3. Ανακατασκευάζονται τα κτίρια με τις εφαρμογές Mapple και Polyfit.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη και τον έλεγχο της συγκεκριμένης μεθόδου χωρίζονται σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα συμπεριλαμβάνει ορθοφωτογραφίες των 10 cm και νέφη σημείων με πυκνότητα 50 σημεία/m² για το κέντρο του Ντόρτμουντ και η δεύτερη συμπεριλαμβάνει ορθοφωτογραφίες των 12 cm και νέφη σημείων με πυκνότητα 30 σημεία/m² για το Μπέργκαμο της Ιταλίας.

Για την κατάτμηση των ορθοφωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN) το οποίο έχει σχεδιαστεί για την ομαδοποίηση δεδομένων (Kohonen's Self-Organizing Map). Με το σχεδιασμό του, αυτό το SOM έχει μια μη επιτηρούμενη προσέγγιση για την εκπαίδευση, και με αυτή την εκπαίδευση το δίκτυο δημιουργεί ένα χάρτη για τα δεδομένα. Έτσι δημιουργήθηκε η μάσκα για τη βλάστηση, ώστε να διαχωριστεί αυτή από τον υπόλοιπο αστικό ιστό.

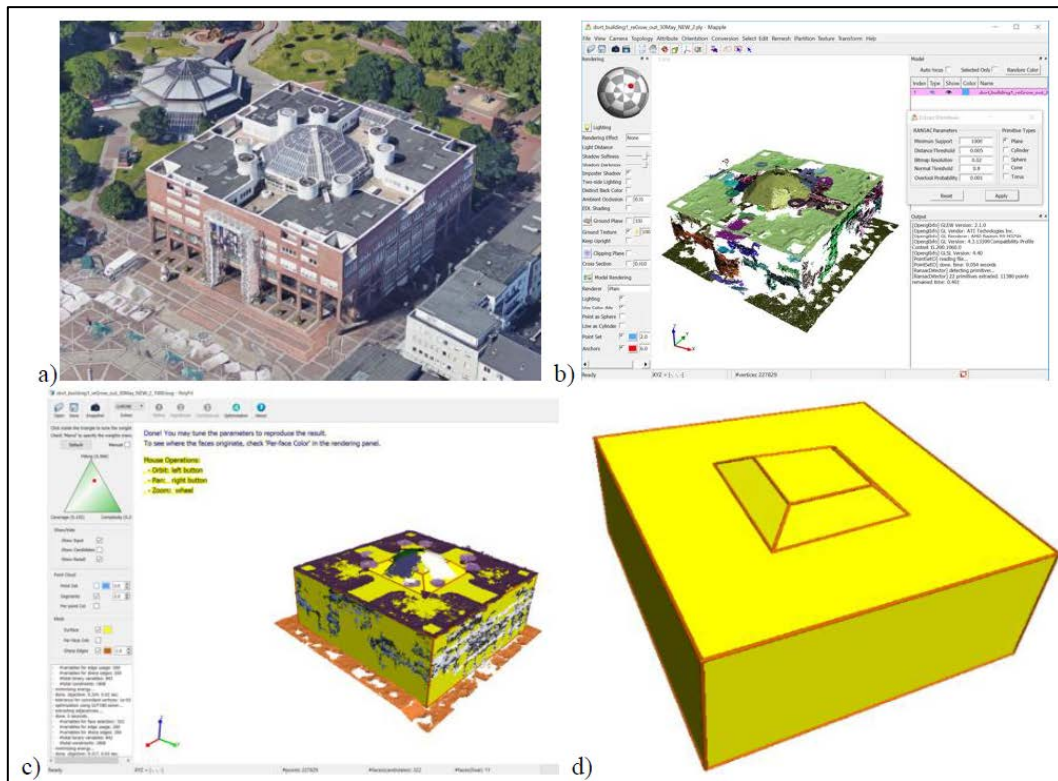
Το επόμενο βήμα είναι η κατάτμηση του νέφους σημείων ώστε να διαχωριστούν τα κτίρια από τα υπόλοιπα αντικείμενα του εδάφους, τους δρόμους κ.λπ.. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη PCL (Point Cloud Library) η οποία βασικά ανιχνεύει σημεία που δημιουργούν μια λεία επιφάνεια αν συγκεντρωθούν μαζί, και αυτό αποφασίζεται με τη σύγκριση των διανυσμάτων της επιφάνειας των γειτονικών σημείων. Η σύγκριση γίνεται με τον υπολογισμό της καμπυλότητας για κάθε σημείο, ο οποίος βασίζεται σε ένα διάνυσμα, και τα σημεία ταξινομούνται. Προηγείται η προβολή της μάσκας της βλάστησης που έχει δημιουργηθεί στο προηγούμενο στάδιο.



Εικόνα 2.12: Ντόρτμουντ - Το νέφος σημείων, η εφαρμογή της μάσκας βλάστησης, η ταξινόμηση του νέφους, και ο τελικός διαχωρισμός των κτιρίων (Ozdemir, Remondino 2018).

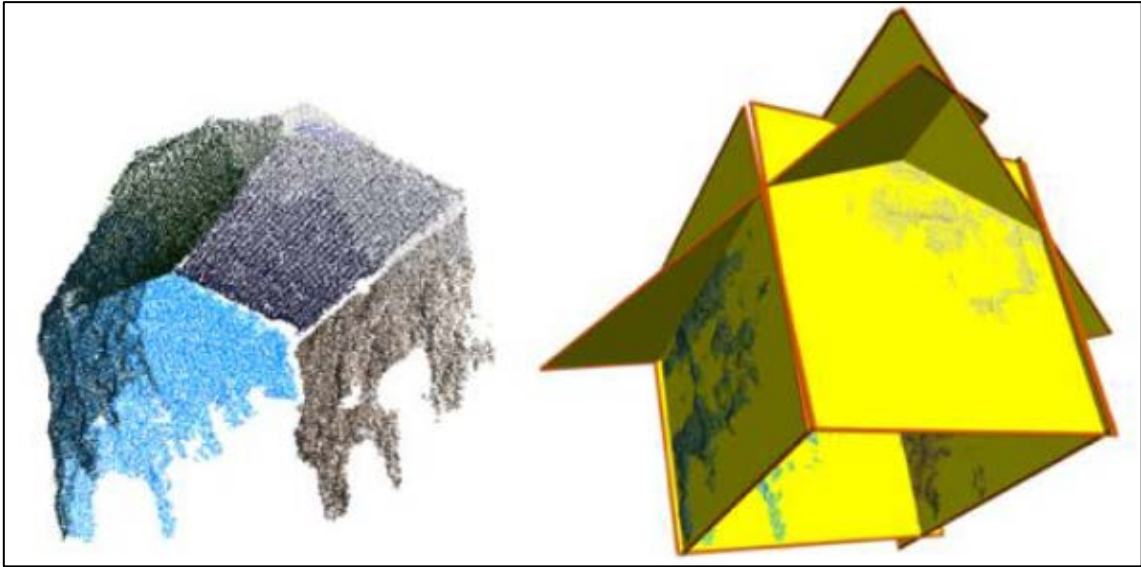
Μετά τον εντοπισμό των κτιρίων, η μοντελοποίησή τους πραγματοποιείται με τις εφαρμογές Marple και Polyfit. Το Marple στην ουσία είναι ένα ανοιχτό λογισμικό για την επεξεργασία και την οπτικοποίηση νέφους σημείων. Χρησιμοποιείται για την εξαγωγή επίπεδων τμημάτων από νέφη σημείων με χρήση Ransac. Αυτές οι επιφάνειες χρησιμοποιούνται σαν υποψήφιες και το Polyfit δημιουργεί ένα υποσύνολο βάσει της γωνίας που σχηματίζουν οι γειτονικές επιφάνειες ($\theta < 10^\circ$). Το Polyfit (Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds) συμπεριλαμβάνει τα εξής:

1. Εισαγωγή νέφους σημείων.
2. Εντοπισμός επιπέδων με Ransac.
3. Αποκοπή έξτρα (βοηθητικών) επιπέδων.
4. Επαναπροσδιορισμός βοηθητικών επιπέδων.
5. Προσδιορισμός υποψήφιων επιπέδων για συγχώνευση.
6. Ανακατασκευή μοντέλου.



Εικόνα 2.13: Δημαρχείο Ντόρτμουντ. α) Μοντέλο από το Πυκνό Νέφος Σημείου β) Πρωτογενής εξαγωγή από Marble c) Επεξεργασία στο PolyFit d) Τελικό Αποτέλεσμα Ανακατασκευής (Ozdemir, Remondino 2018).

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας δείχνουν πως η κατάτμηση ορθοφωτογραφιών υψηλής ανάλυσης με την αξιοποίηση μάσκας βλάστησης μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην ταξινόμηση τρισδιάστατων νεφών σημείων, έτσι ώστε να αναγνωρίζονται με μεγαλύτερη ευκολία τα κτίρια. Η γεωμετρική ανακατασκευή των κτιρίων, με βάση το RANSAC και την ανάπτυξη επιφανειών, παρήγαγε επιτυχημένα αποτελέσματα, αν και σε περιπτώσεις χαμηλών σημείων στις προσόψεις ή τις στέγες η μοντελοποίηση είχε σφάλματα, ενώ κάποια κτίρια δεν ανακατασκευάστηκαν. Αυτό οφείλεται κυρίως σε θόρυβο που εντοπίστηκε στο νέφος σημείων ή την έλλειψη πληροφορίας.



Εικόνα 2.14: Αποτυχημένη ανακατασκευή κτιρίου στην πόλη του Μπεργκάμο (Ozdemir, Remondino 2018).

3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΕ ΝΕΦΗ ΣΗΜΕΙΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ

3.1. Περιοχές μελέτης - Δεδομένα

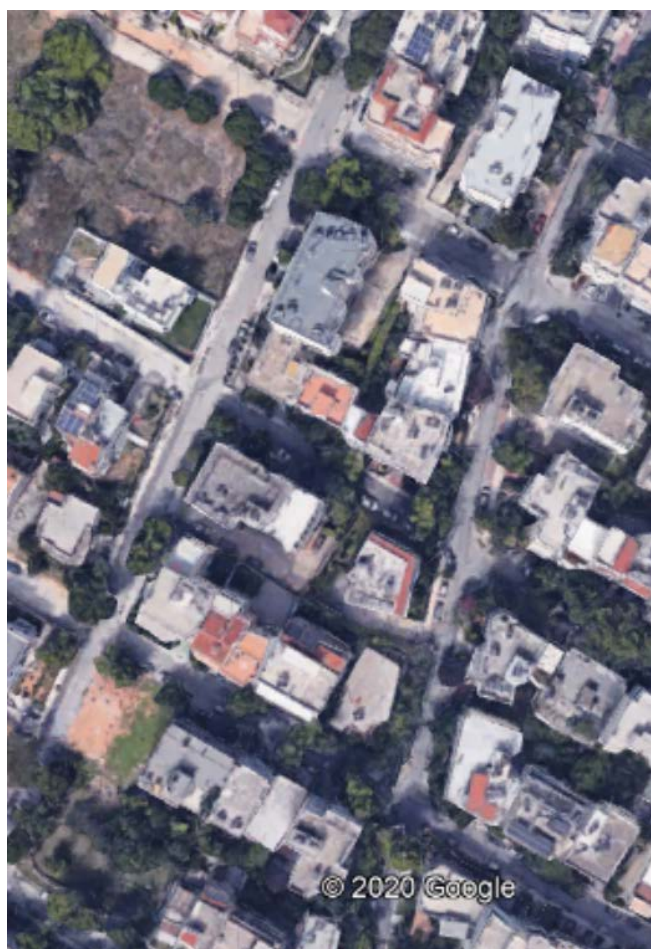
Τα τρισδιάστατα δεδομένα που αξιοποιούνται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέρχονται από τεχνικές SFM (Structure from Motion). Έγινε επιλογή δύο διαφορετικών περιοχών μελέτης προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας τόσο στην περίπτωση ενός οικισμού, όσο και στην περίπτωση μιας περιοχής αστικού ιστού.

Το πρώτο σετ δεδομένων είναι ένα πυκνό νέφος 65.694.068 σημείων για το Βλαχόπουλο της Μεσσηνίας, έναν ορεινό οικισμό ο οποίος υπάγεται διοικητικά στον Δήμο Πύλου – Νέστορος. Πρόκειται για μια περιοχή με υψόμετρα από τη Μέση στάθμη της θάλασσας από 410 έως 483 m, κτίρια έως και δύο ορόφων στην πλειοψηφία τους και με κεραμοσκεπή, άναρχα και διάσπαρτα χωροθετημένα. Ο οικισμός απαρτίζεται επίσης από αρκετές χαμηλότερες κατασκευές με ελενίτ και πλακοσκεπή, καθώς και αραιή σχετικά βλάστηση, η οποία σε κάποια σημεία αποτελείται κυρίως από ελαιόδεντρα.



Εικόνα 3.1: Απόσπασμα οικισμού από Google Earth.

Το δεύτερο σετ δεδομένων είναι ένα πυκνό νέφος 20.468.335 σημείων όπου απεικονίζεται μια περιοχή μικρότερης έκτασης στη Θέση «Ηπειρώτικα», στο Δήμο Ηρακλείου Αττικής, η οποία ανήκει διοικητικά στο πολεοδομικό συγκρότημα των Αθηνών, στον βόρειο τομέα. Πρόκειται για περιοχή με υψόμετρα από τη Μέση στάθμη της θάλασσας από 217 έως 227 m, ψηλές πολυώροφες πολυκατοικίες στην πλειοψηφία τους και με πλακοσκεπή, πολλές εκ των οποίων έχουν χωροθετηθεί η μία σε επαφή στην άλλη. Η περιοχή απαρτίζεται επίσης από αραιή βλάστηση, η οποία σε κάποια σημεία καλύπτει τα κενά ανάμεσα στα κτίρια.



Εικόνα 3.2: Απόσπασμα αστικό ιστού από Google Earth.

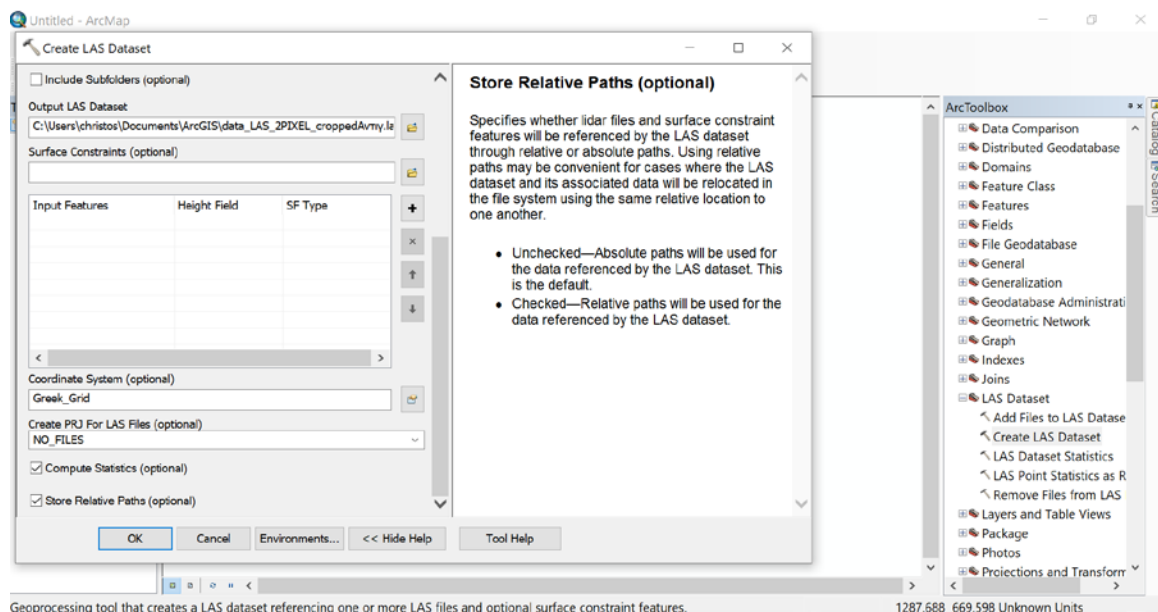
3.2. Ταξινόμηση με το λογισμικό ArcMap 10.5

Για την ταξινόμηση του νέφους, αρχικά έγινε επεξεργασία στο λογισμικό Arcgis 10.5. Χρησιμοποιήθηκε το LAS Dataset, ένα σύνολο εργαλείων για την ανάλυση και τη διαχείριση της ταξινόμησης νεφών σημείων (κυρίως Lidar). Ανήκει στην εργαλειοθήκη

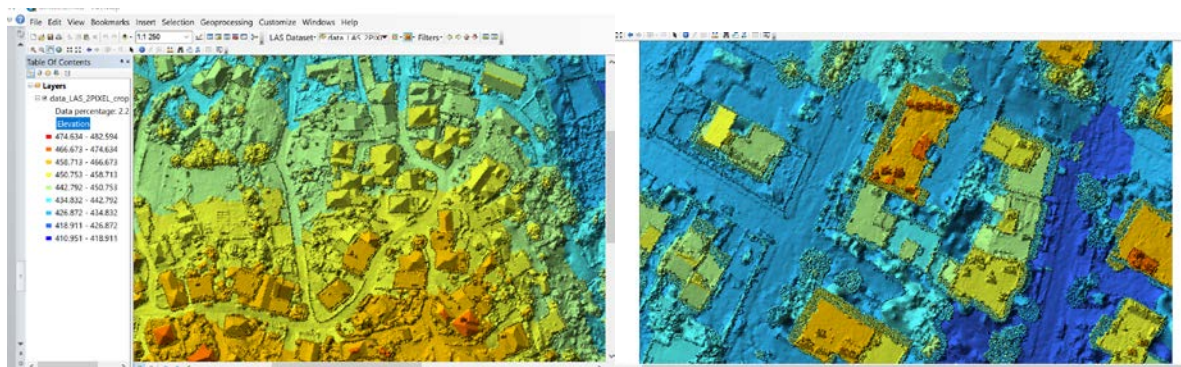
Διαχείρισης Εργαλείων (Data Management). Η επεξεργασία έγινε στην έκδοση 10.5 του ArcMap, επειδή ακριβώς διαθέτει συγκεκριμένη επιλογή που αφορά την ταξινόμηση κτιρίων από νέφη σημείων, αξιοποιώντας κάποια επιπλέον κριτήρια σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις του ArcMap.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και στις δύο περιοχές μελέτης είναι ίδια. Αρχικά δημιουργήθηκαν σεντ αρχείων για αυτά τα δεδομένα, απαραίτητη προϋπόθεση για την επεξεργασία στη συνέχεια. Σε αυτό έγινε η επιλογή των αρχείων (.las) και το σύστημα συντεταγμένων (ΕΓΣΑ '87 – Greek Gid).

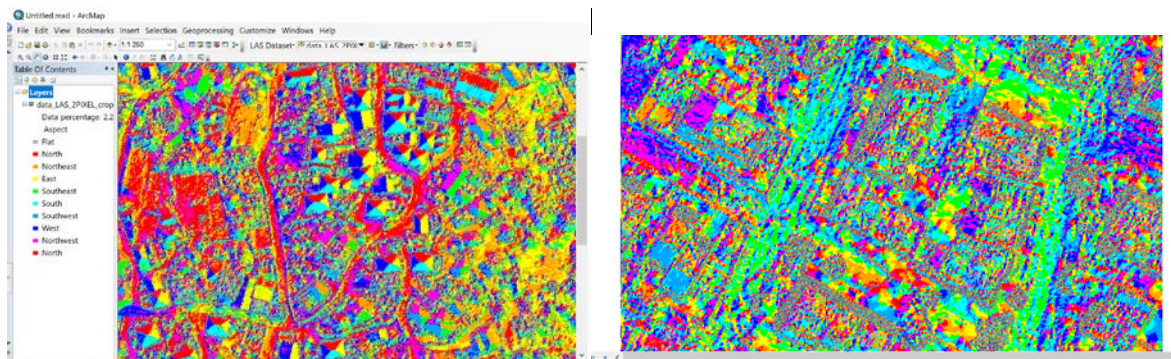
Από τη στιγμή που δημιουργείται αυτό το σεντ δεδομένων, το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να ταξινομήσει από μόνο του τα δεδομένα, βάσει του υψομέτρου, της κλίσης που υπολογίζεται αυτόματα, αλλά και χαρακτηριστικών, τα οποία υπολογίζονται από τα υψόμετρα και τις αποστάσεις των σημείων.



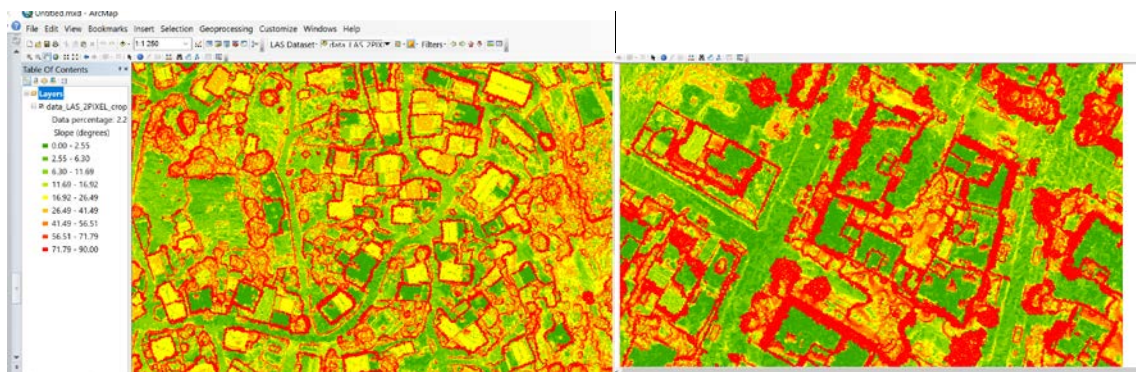
Εικόνα 3.3: Δημιουργία dataset .las.



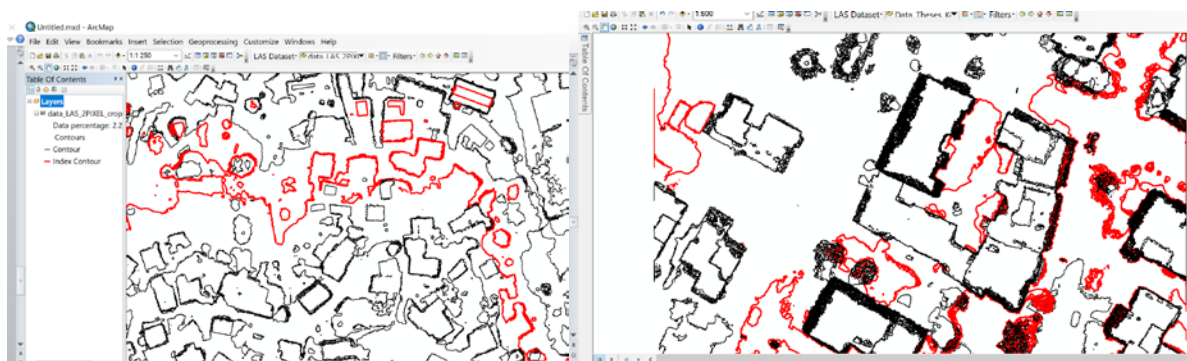
Εικόνα 3.4: Μοντέλο Υψομετρικό.



Εικόνα 3.5: Όψεις.



Εικόνα 3.6: Κλίσεις.

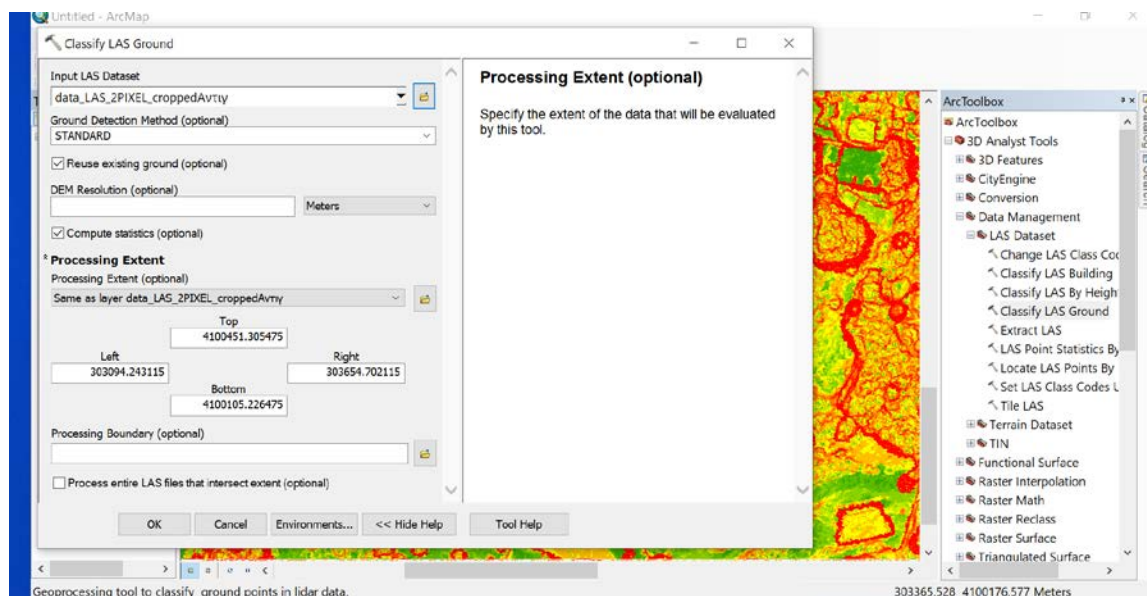


Εικόνα 3.7: Ισοϋψείς.

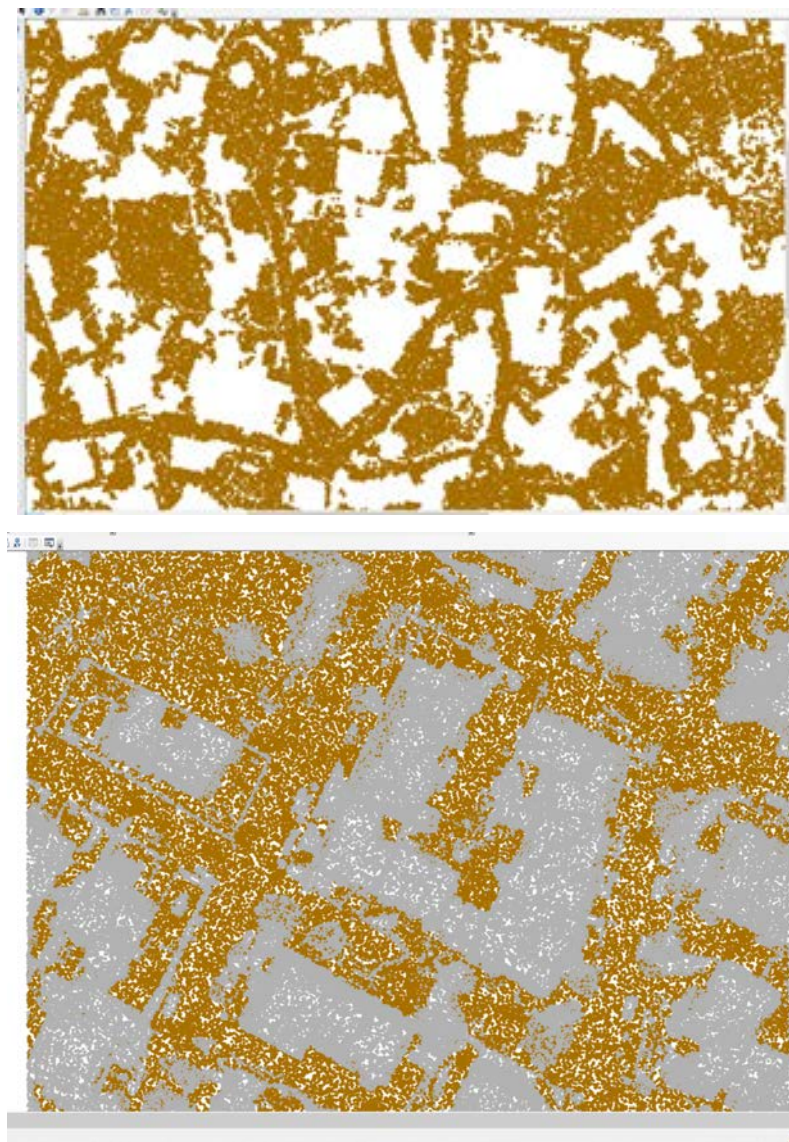
Η ταξινόμηση κτιρίων, βλάστησης και λοιπών στοιχείων στο λογισμικό γίνεται εφόσον έχει προηγηθεί ταξινόμηση των σημείων εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται με το

εργαλείο Classify LAS Ground. Τα σημεία εδάφους αξιοποιούνται για να ταξινομηθούν τα υπόλοιπα σημεία του νέφους.

Το εργαλείο αυτό για να λειτουργήσει σωστά απαιτεί δεδομένα σε ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς. Το λογισμικό δίνει την ευχέρεια στο χρήστη να επιλέξει πως θα γίνει ταξινόμηση ανάλογα με το έδαφος της περιοχής μελέτης. Στην περίπτωση που εξετάζεται επιλέχθηκε η τυπική μέθοδος για την ταξινόμηση του εδάφους, η οποία έχει ανοχή για ομαλές μεταβολές των κλίσεων και του ανάγλυφου. Δεν επιλέγεται η συμβατική επιλογή που είναι για ανάγλυφο χωρίς αλλαγές της κλίσης, ούτε όμως και η πιο “επιθετική”, γιατί υπάρχει ο κίνδυνος να συμπεριληφθούν στα σημεία εδάφους και σημεία της βλάστησης.



Εικόνα 3.8: Σημεία Εδάφους - Επιλογή Παραμέτρων.



Εικόνα 3.9: Σημεία Εδάφους με καφέ χρώμα. Η πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στον οικισμό, η δεύτερη στην αστική περιοχή.

Στη συνέχεια, για τον αυτόματο εντοπισμό των σημείων που αντιστοιχούν σε κτίρια, αξιοποιήθηκε το εργαλείο Classify LAS Building. Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί αυτή η επιλογή του λογισμικού είναι οι εξής:

1. Το ύψος από το έδαφος που ορίζει το χαμηλότερο σημείο από το οποίο θα εντοπιστούν τα σημεία από τη στέγη των σπιτιών.
2. Η μικρότερη περιοχή (εμβαδόν) των συνεπίπεδων σημείων που θα χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί η παρουσία μιας στέγης του κτιρίου.
3. Ο υπολογισμός στατιστικών στοιχείων της ταξινόμησης κατά την επεξεργασία.
4. Ο προσδιορισμός των γεωγραφικών ορίων της ταξινόμησης.

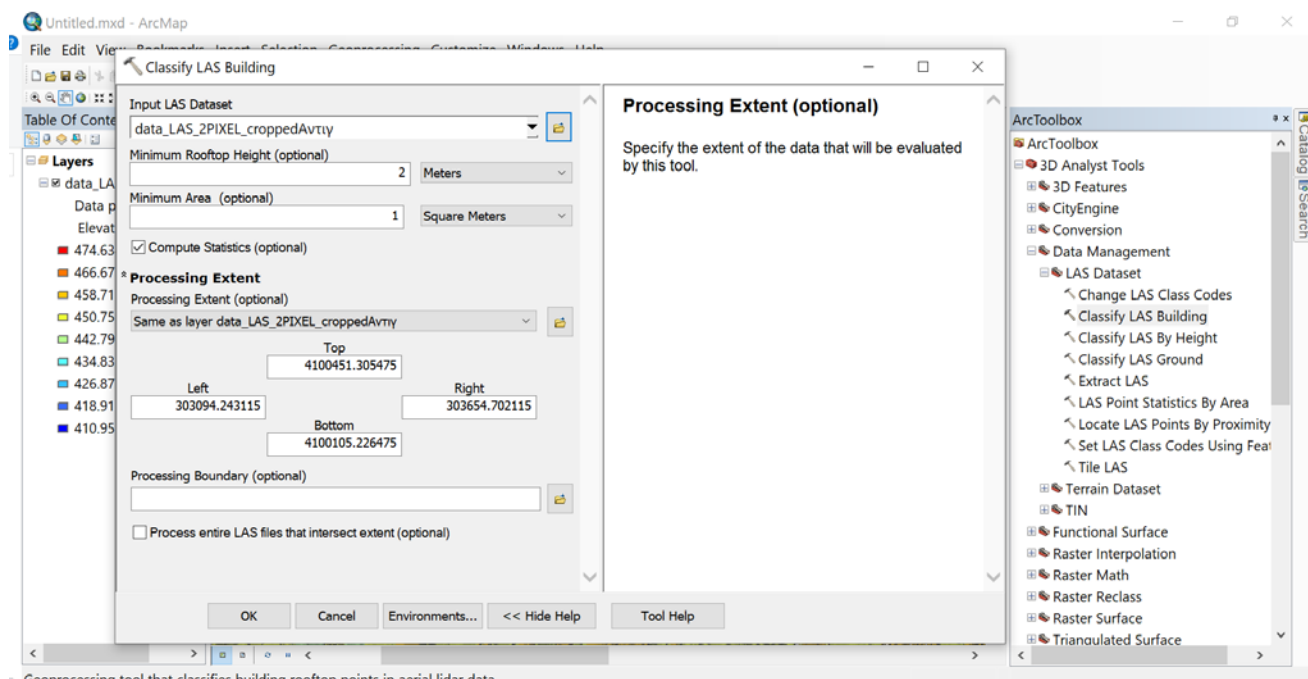
Σε μεταγενέστερη έκδοση του Arcgis οι επιλογές παραμέτρων είναι περισσότερες. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων τα οποία υπολογίζονται ως σημεία στέγης κτιρίου, να ταξινομήσει εκ νέου τα σημεία που έχουν ταξινομηθεί προηγουμένως με διαφορετικά κριτήρια και, τέλος, να δηλώσει αν τα δεδομένα έχουν δημιουργηθεί φωτογραμμετρικά ή όχι.

Η επιλογή των παραμέτρων στο σετ δεδομένων του οικισμού (Εικ. 3.10), η οποία αφορά το ελάχιστο ύψος και την ελάχιστη επιφάνεια που πρέπει να καλύπτουν τα σημεία των κτιρίων που ανήκουν στην ίδια επιφάνεια, με βάση τα δεδομένα τα οποία διατίθενται, έμειναν έτσι όπως το πρόγραμμα καθορίζει ως προεπιλογή. Δηλαδή 2 m για το ύψος και 1 m² για το εμβαδόν.

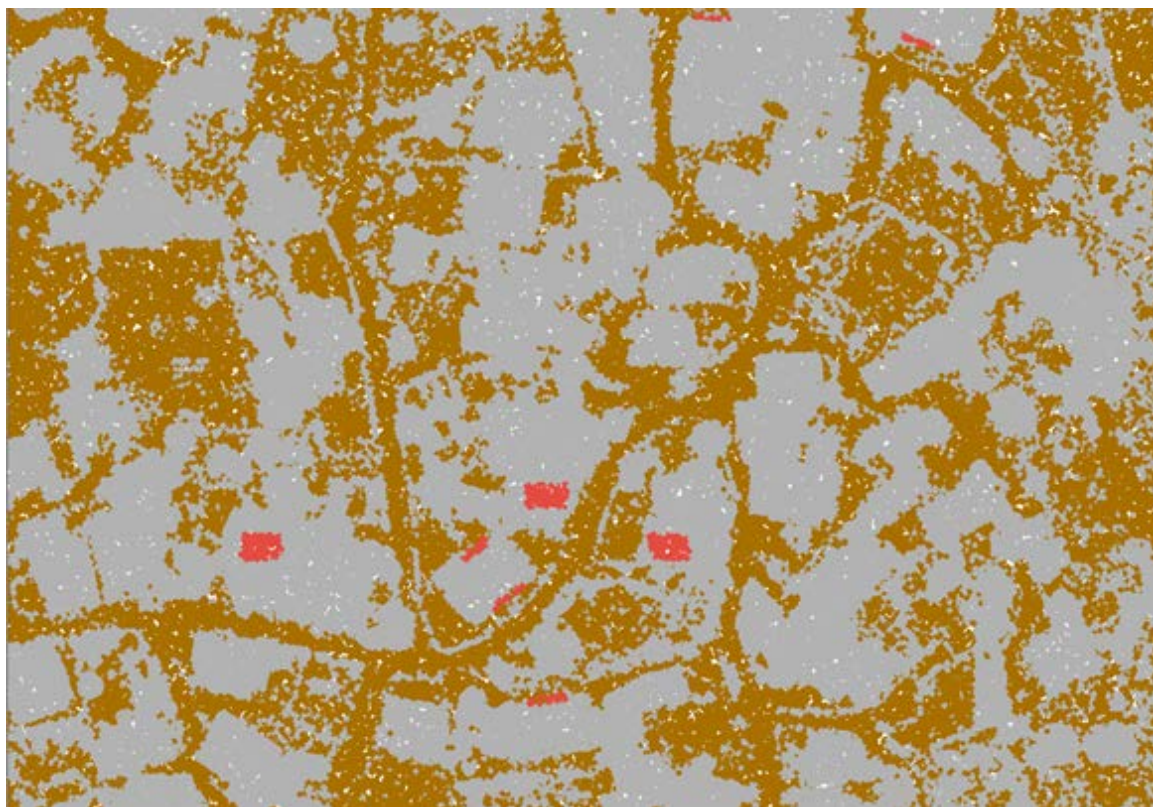
Σε προηγούμενη δοκιμή, επιλέχθηκε η παράμετρος της επιφάνειας να είναι στα 15 – 20 m², η μικρότερη κατά μέσο όρο επιφάνεια που μπορεί να αποτελεί στέγη. Τα αποτελέσματα όμως δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, ο εντοπισμός των κτιρίων δεν έγινε σωστά (Εικ. 3.11). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες επιφάνειες των κτιρίων του οικισμού δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Το 1 m² ως προεπιλογή βοήθησε στον εντοπισμό ιχνών των περισσότερων κτιρίων (Εικόνα 3.12). Βέβαια στα αποτελέσματα, συμπεριλαμβάνεται αρκετός θόρυβος, ενώ υπάρχουν χαμηλά κτίρια τα οποία δεν έχουν εντοπιστεί. Προβλήματα εντοπίζονται και σε περιοχές όπου η βλάστηση είναι πιο έντονη και πιο πυκνή, στο ύψος των κτιρίων, με αποτέλεσμα να υπολογίζονται τα σημεία αυτά ως κτίρια.

Αντίστοιχα, στην αστική περιοχή, έγιναν διαφορετικές δοκιμές με εναλλαγές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Ωστόσο, η ταξινόμηση για τα κτίρια δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα (Εικ. 3.11). Πιθανόν το αποτέλεσμα να επηρεάζεται από την πυκνή δόμηση των κτιρίων, καθώς πολλά κτίρια είναι ανά ζεύγη και τα περισσότερα είναι κτισμένα το ένα δίπλα στο άλλο χωρίς να υπάρχει κάποιο κενό. Δεν μπορεί να αιτιολογηθεί με διαφορετικό τρόπο η απόκλιση του αποτελέσματος από την πραγματικότητα.



Εικόνα 3.10: Ταξινόμηση Κτιρίων - Επιλογή Παραμέτρων.



Εικόνα 3.11: Ταξινόμηση Κτιρίων Οικισμού- Ελάχιστη Επιφάνεια 20 τμ.



Εικόνα 3.12: Ταξινόμηση Κτιρίων οικισμού - Ελάχιστη Επιφάνεια 1 τμ.



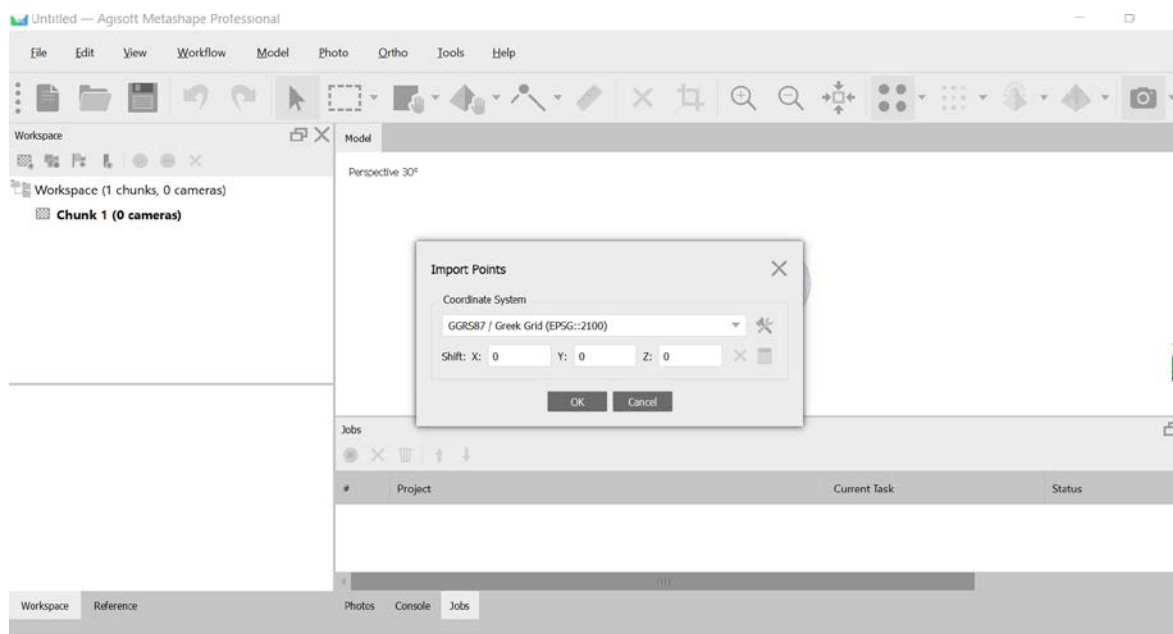
Εικόνα 3.13: Ταξινόμηση Κτιρίων αστικού ιστού - Ελάχιστη Επιφάνεια 1 τμ.

3.3. Ταξινόμηση με το Agisoft Metashape Professional 1.5.4.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία στο λογισμικό ArcMap από οπτική άποψη δεν ήταν ικανοποιητικά για κανένα από τα σετ δεδομένων και δεν μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την μοντελοποίηση κτιρίων σε επόμενο στάδιο.

Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε δεύτερη απόπειρα ταξινόμησης των δεδομένων με επεξεργασία στο λογισμικό Agisoft Metashape Professional 1.5.4. Η καινούργια έκδοση του Agisoft έχει περισσότερες επιλογές όσον αφορά την επεξεργασία νέφους σημείων, αλλά και το ίδιο το περιβάλλον του προγράμματος είναι πιο φιλικό προς το χρήστη σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις. Μία επιλογή η οποία δεν υπήρχε είναι η εισαγωγή και εξαγωγή αρχείων las.

Αρχικά λοιπόν έγινε εισαγωγή των σημείων, με τη δυνατότητα να διατηρηθεί το σύστημα συντεταγμένων (ΕΓΣΑ '87). Το συγκεκριμένο λογισμικό λειτουργεί και ως πολύ αποτελεσματικό viewer για νέφη σημείων, γεγονός που διευκολύνει το χρήστη να αντιληφθεί καλύτερα τα χαρακτηριστικά της περιοχής ενδιαφέροντος.



Εικόνα 3.14: Εισαγωγή Σημείων στο Agisoft.



Εικόνα 3.15: Οπτικοποίηση νέφους σημείων οικισμού.



Εικόνα 3.16: Οπτικοποίηση νέφους σημείων αστικής περιοχής.

Το Classify Ground Points είναι ένα εργαλείο για την επεξεργασία του πυκνού νέφους σημείων, το οποίο επιτρέπει τον διαχωρισμό των σημείων εδάφους από τα υπόλοιπα σημεία, με βάση κάποιες παραμέτρους οι οποίες επιλέγονται από το χρήστη.

Αρχικά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει αν η ταξινόμηση θα πραγματοποιηθεί σε ολόκληρο το νέφος ή όχι. Η πρώτη παράμετρος στην οποία μπορεί ο χρήστης να παρέμβει είναι η μέγιστη κλίση που μπορεί να έχει το έδαφος. Δηλαδή επιλέγει τη γωνία μεταξύ του μοντέλου εδάφους και του ευθύγραμμου τμήματος το οποίο συνδέει το εκάστοτε σημείο που πρόκειται να ταξινομηθεί με ένα σημείο από μία κλάση που περιλαμβάνει σημεία εδάφους. Σε αυτό το σημείο αξίζει να παρατηρηθεί πως, για σχετικά επίπεδα μοντέλα, προτείνεται η ρύθμιση της κλίσης στις 15° , ενώ για πιο απότομες κλίσεις είναι πιο λογικό να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες τιμές.

Υπάρχει ακόμη μια παράμετρος η οποία καθορίζει κάθε φορά τη μέγιστη διακύμανση των υψομέτρων του εδάφους και συμπληρώνεται σε μονάδες m. Στην ουσία ο χρήστης επιλέγει την απόσταση μεταξύ του σημείου που πρόκειται να ταξινομηθεί και του μοντέλου εδάφους.

Τέλος, επιλέγεται το μέγεθος των κελιών, σύμφωνα με το οποίο θα χωριστεί το νέφος σημείων για να γίνουν οι υπολογισμοί. Το μέγεθος του κελιού που υπολογίζεται δεν μπορεί να είναι μικρότερο από την μεγαλύτερη περιοχή στο νέφος που δεν συμπεριλαμβάνει σημεία εδάφους. Τέτοιες επιφάνειες είναι κτίρια, δάση κ.λπ.

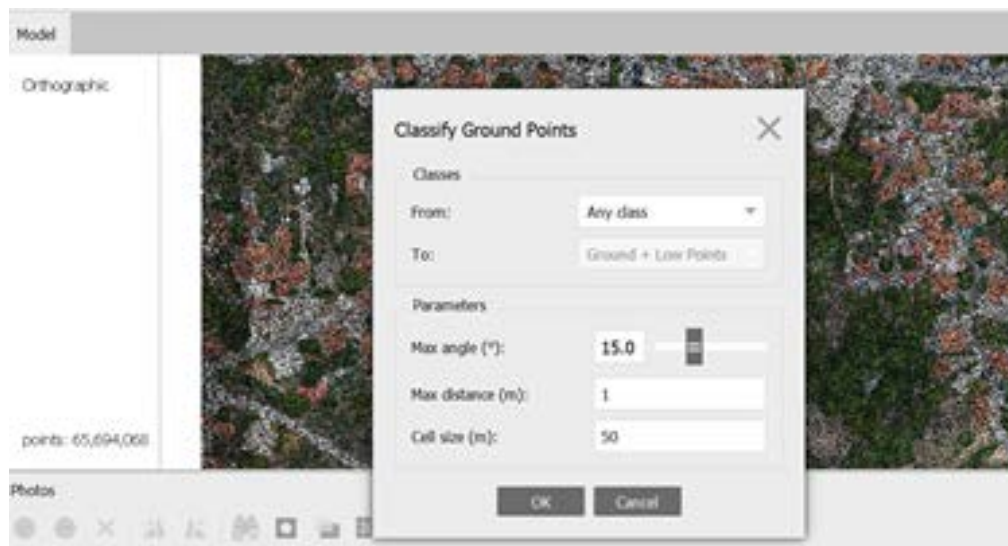
Επομένως οι παράμετροι έμειναν έτσι όπως το πρόγραμμα καθορίζει ως προεπιλογή. Μέγιστη γωνία 15° , μέγιστη απόσταση 1 m, μέγεθος κελιού 50 m.

Η ταξινόμηση πραγματοποιείται σε δύο βήματα:

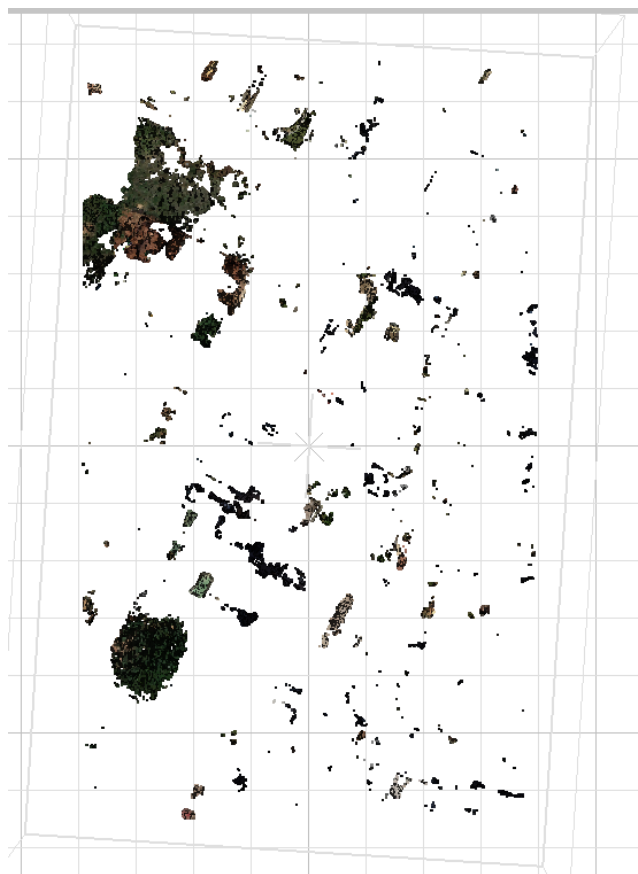
- Στο πρώτο βήμα το νέφος σημείων χωρίζεται σε κελιά όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, και σε κάθε κελί υπολογίζεται το σημείο με το μικρότερο υψόμετρο. Στη συνέχεια με τριγωνισμό των σημείων αυτών προκύπτει η πρώτη εκτίμηση του μοντέλου εδάφους.

- Στο δεύτερο βήμα προστίθεται καινούργιο σημείο το οποίο πληροί τα δύο κριτήρια τα οποία τέθηκαν και αφορούν τη μέγιστη απόσταση και τη γωνία που επιλέγει ο χρήστης, όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω. Το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι ότου ελεγχθούν όλα τα σημεία.

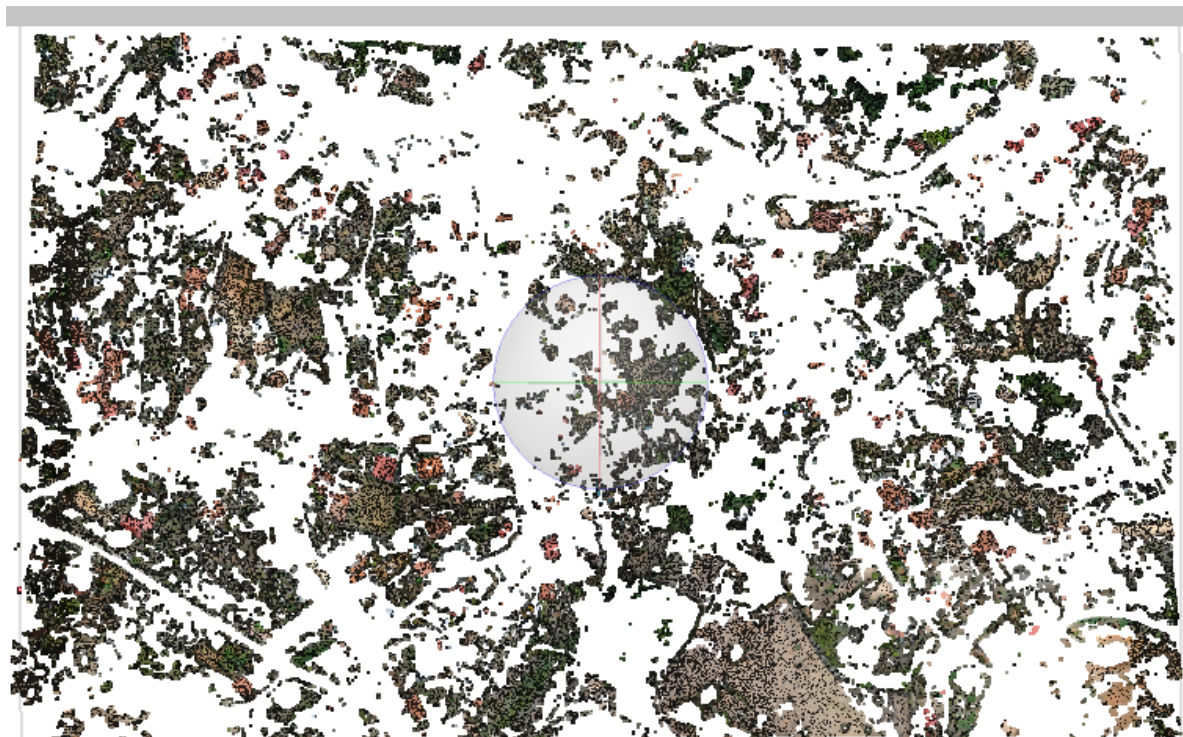
Η ταξινόμηση δίνει σε γενικές γραμμές καλά αποτελέσματα και για τα δύο dataset, αλλά εκεί όπου η βλάστηση είναι πιο πυκνή και συγχέεται με τα σπίτια παρατηρείται πως κάποιες στέγες έχουν ληφθεί σαν ground points. Αυτό μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό και στα στιγμιότυπα οθόνης που τα σημεία φαίνονται στις Εικ. 3.18 και 3.19.



Εικόνα 3.17: Επιλογές ταξινόμησης εδάφους.



Εικόνα 3.18: Αποτελέσματα ταξινόμησης εδάφους σε RGB για την αστική περιοχή.



Εικόνα 3.19: Αποτελέσματα ταξινόμησης εδάφους σε RGB για τον οικισμό.

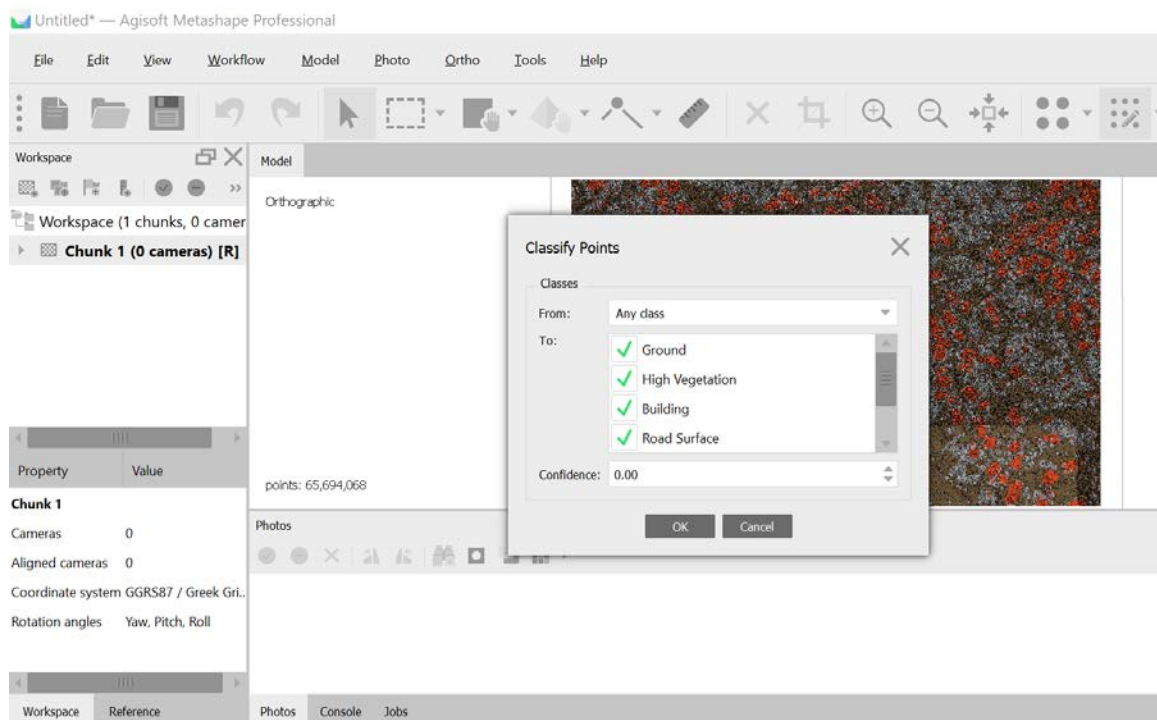
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αυτόματη ταξινόμηση του νέφους, καθώς το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει αυτόματα ταξινόμηση στο νέφος των σημείων και να το κατατμήσει σε πολλαπλές κλάσεις.

Η ταξινόμηση πραγματοποιείται με τεχνικές εκμάθησης μηχανής και οι κατηγορίες που μπορούν να προκύψουν είναι οι εξής: έδαφος, χαμηλή, μεσαία και υψηλή βλάστηση, κτίσματα, οδικό δίκτυο, οχήματα, θόρυβος, και άλλες ανθρώπινες κατασκευές όπως γέφυρες και πύργοι.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια σημεία θα ταξινομήσει και αν αυτά προέρχονται από κάποια προηγούμενη ταξινόμηση, τις κλάσεις και τις κατηγορίες σημείων που επιθυμεί ο χρήστης να δημιουργηθούν, και το επίπεδο εμπιστοσύνης (0 έως 1) το οποίο καθορίζει εάν κάποιο σημείο θα καταγραφεί σε κάποια κλάση ή θα παραμείνει στην κατηγορία των μη ταξινομημένων σημείων.

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ταξινομήσει το νέφος με μη αυτόματο τρόπο και να επιλέξει ο ίδιος ποιες ομάδες σημείων θα ενταχθούν σε κάθε κλάση. Στην περίπτωση που εξετάζεται δεν χρησιμοποιήθηκε η χειροκίνητη μέθοδος.

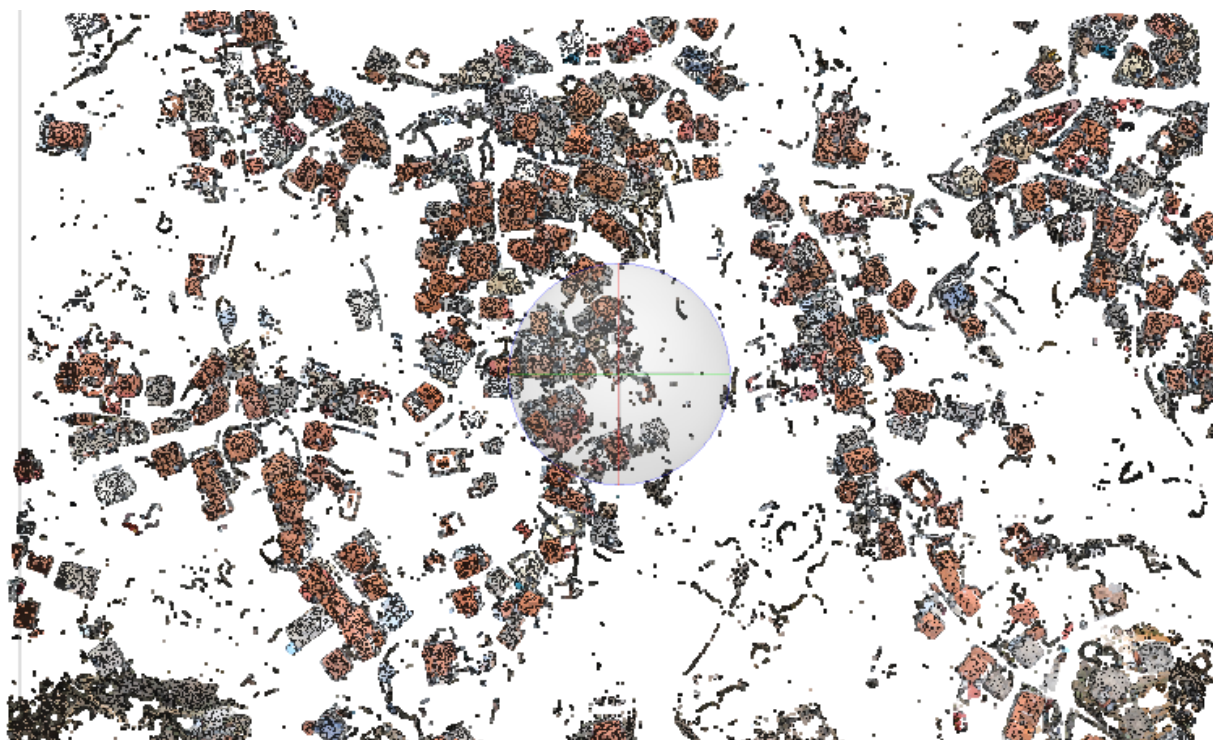
Στην επιλογή των παραμέτρων δεν έγινε κάποια αλλαγή σε σχέση με τις προεπιλογές του προγράμματος, ενώ αφού τελείωσε η ταξινόμηση έγινε εξαγωγή της κλάσης buildings σε ξεχωριστό αρχείο las.



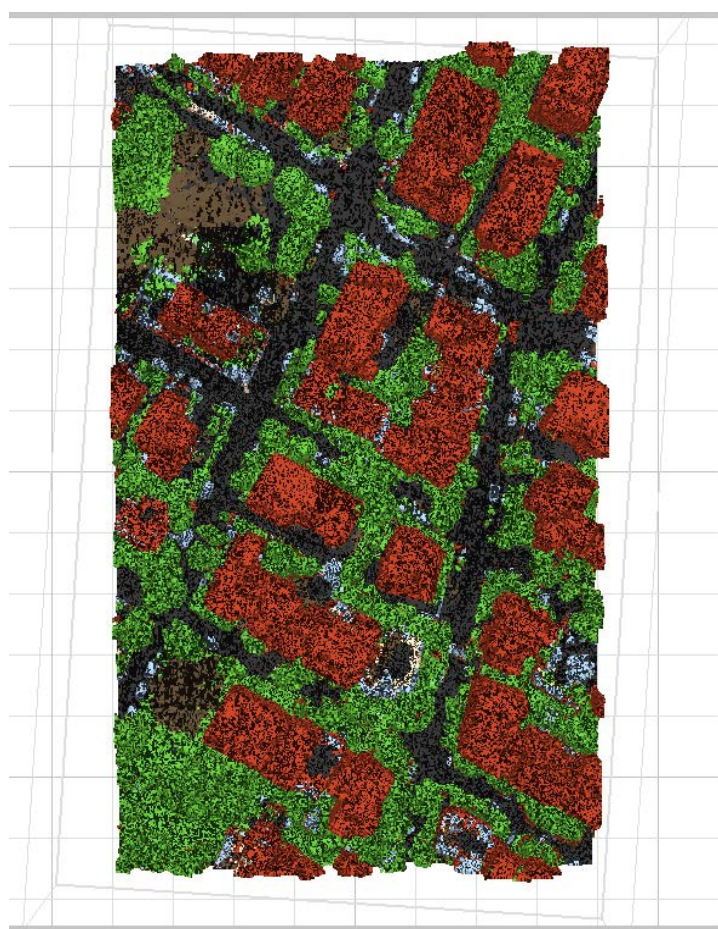
Εικόνα 3.20: Επιλογές ταξινόμησης νέφους.



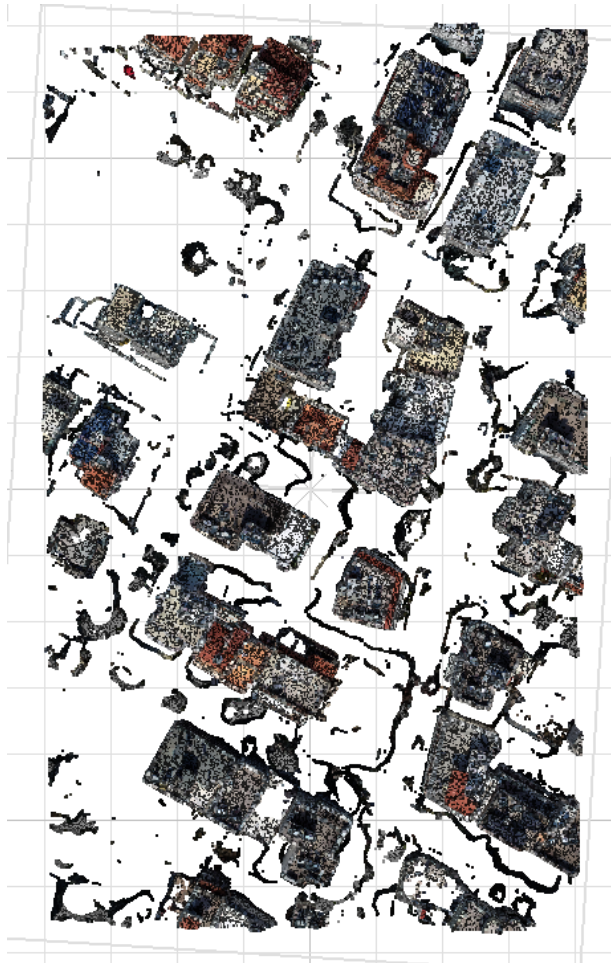
Εικόνα 3.21: Αποτελέσματα ταξινόμησης οικισμού - όλες οι κλάσεις.



Εικόνα 3.22: Αποτελέσματα ταξινόμησης οικισμού – Κτίρια RGB.



Εικόνα 3.23: Αποτελέσματα ταξινόμησης αστικής περιοχής - όλες οι κλάσεις.



Εικόνα 3.24: Αποτελέσματα ταξινόμησης – Κτίρια RGB.

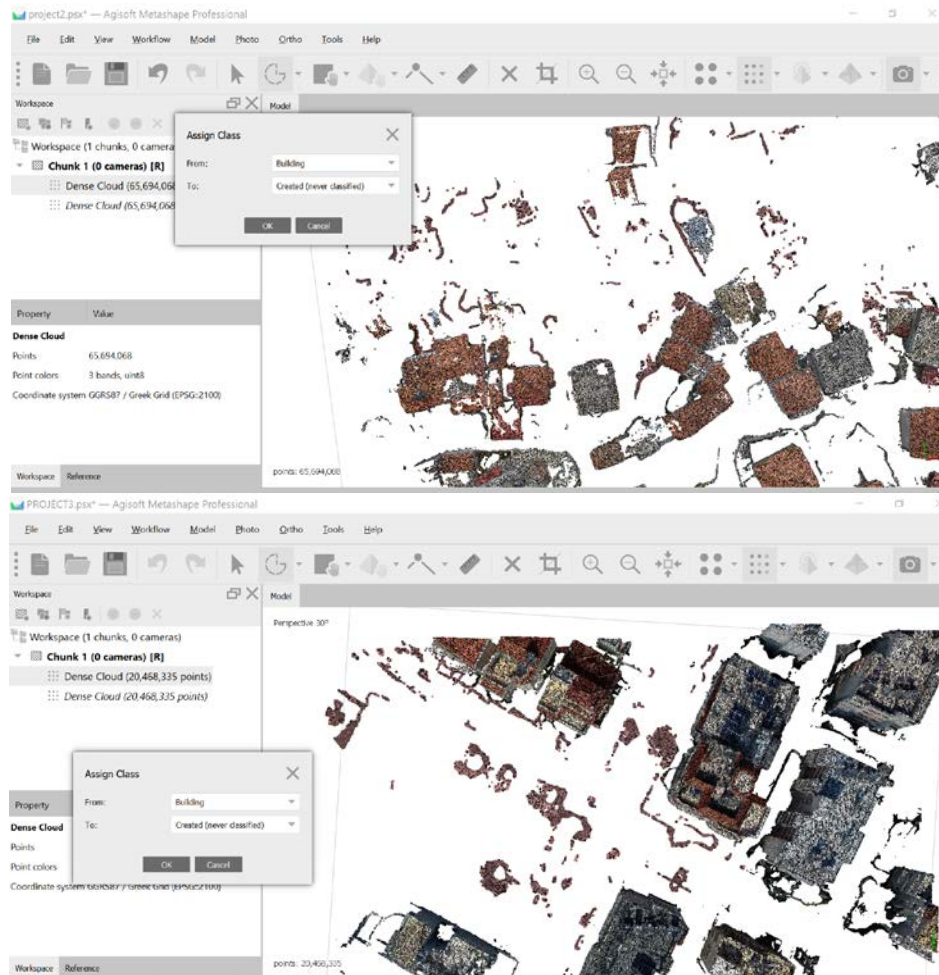
3.4. Αξιολόγηση και παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα της ταξινόμησης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ταξινόμηση στο Agisoft είναι από οπτική άποψη εντυπωσιακά. Για να γίνει όμως μία λεπτομερής σύγκριση της πραγματικότητας με αυτά τα αποτελέσματα, χρειάζεται να υπολογιστούν κάποια στοιχεία ως δείκτες της αξιοπιστίας της ταξινόμησης.

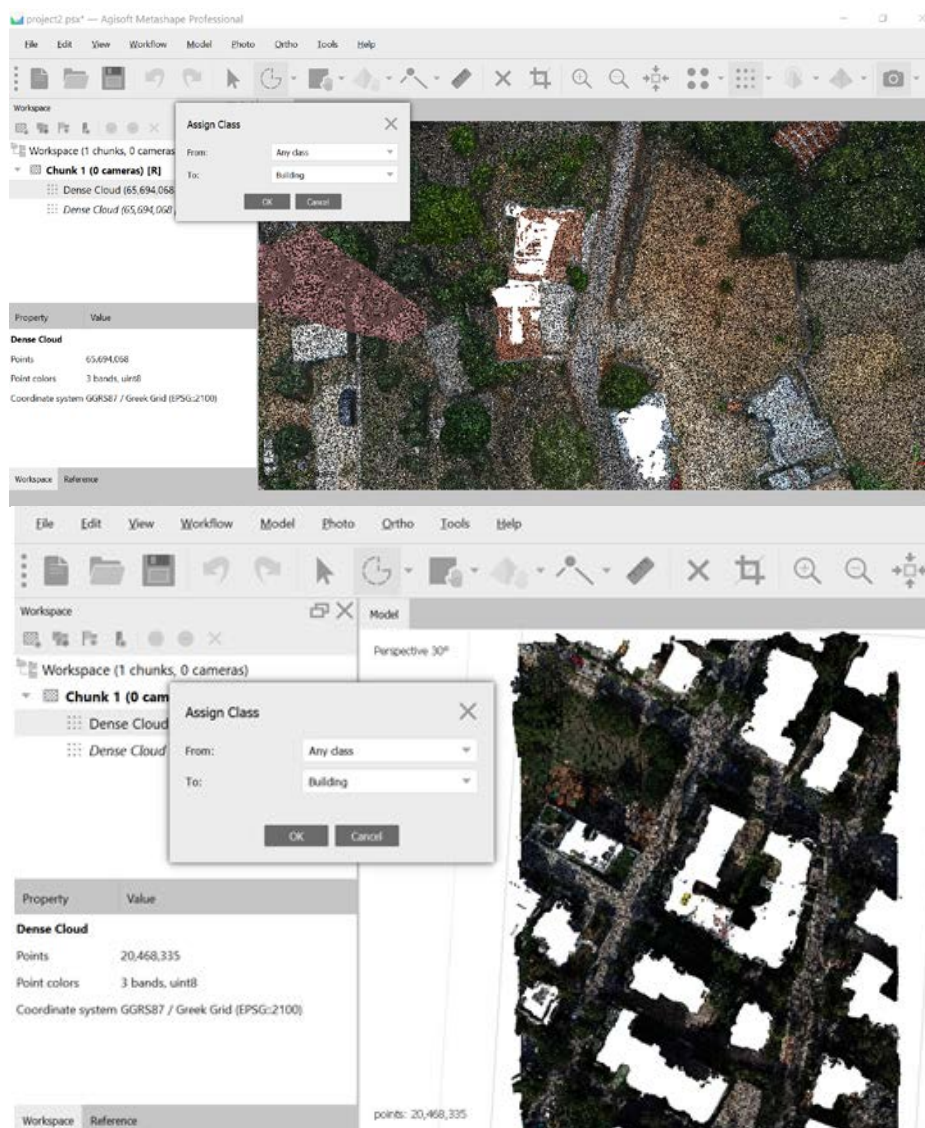
Για το λόγο αυτό χρειάστηκε να δημιουργηθούν δεδομένα αναφοράς (αρχεία groundtruth) στα οποία τα σημεία που αντιστοιχούν σε κτίρια έχουν ταξινομηθεί με μη αυτόματο τρόπο, έτσι ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις σε μία αξιόπιστη βάση.

Το Agisoft δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει χειροκίνητα τα σημεία που επιθυμεί και να τα αναθέσει στην κλάση που αντιστοιχούν. Αρχικά, αναπαράχθηκε το αρχείο της αυτόματης ταξινόμησης, πραγματοποιήθηκε απαλοιφή του θορύβου για τα

σημεία που ανατέθηκαν στην κλάση των κτιρίων κατά την αυτόματη ταξινόμηση του λογισμικού (Εικ. 3.25). Στη συνέχεια, τα σημεία από τις άλλες κλάσεις τα οποία δεν ταξινομήθηκαν αυτόματα από την ταξινόμηση σε σημεία κτιρίων επιλέχθηκαν και ανατέθηκαν στην κλάση «κτίρια» (Εικ. 3.26).

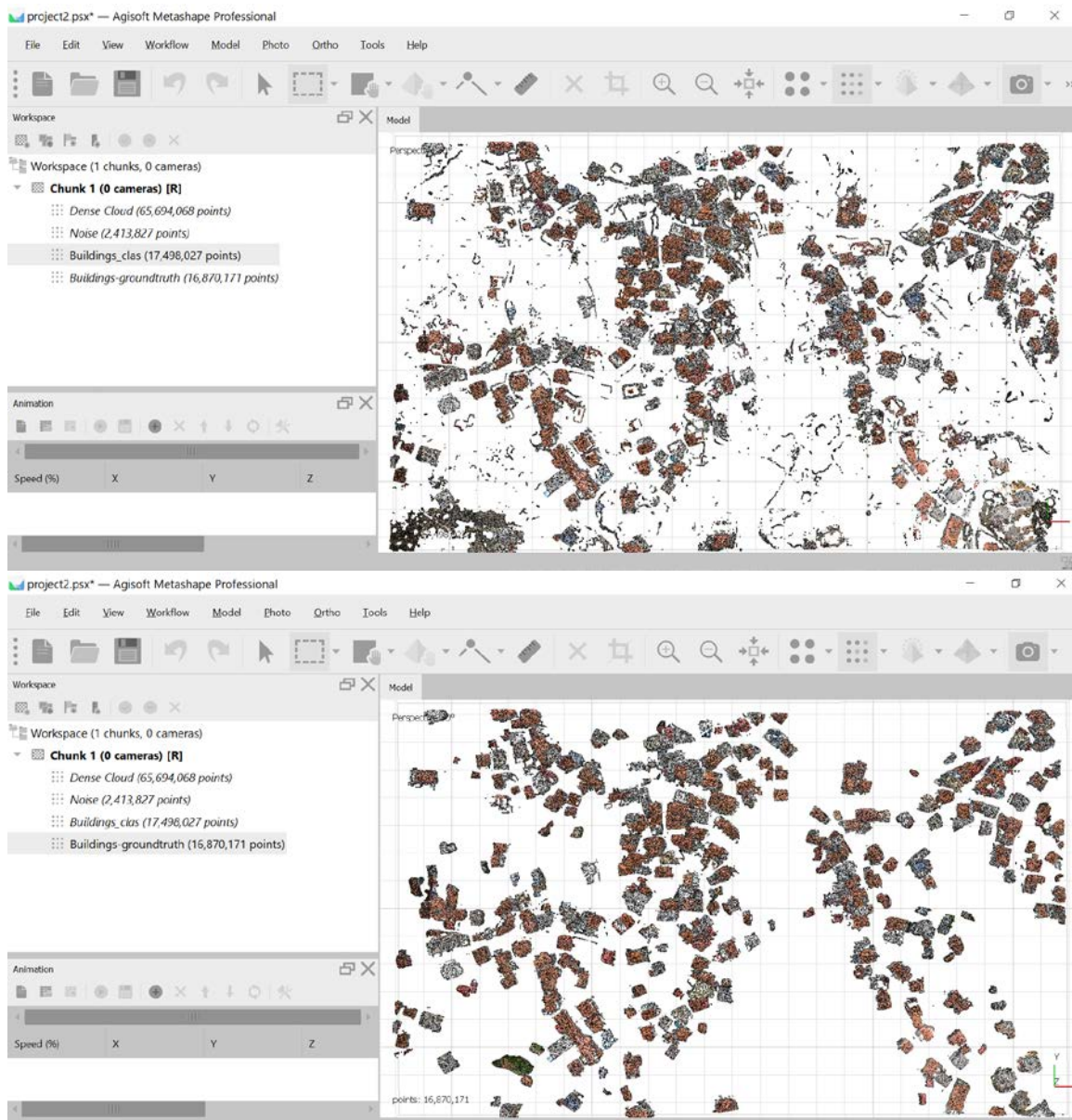


Εικόνα 3.25: Ανάθεση σημείων θορύβου σε ξεχωριστή κλάση, το πάνω στιγμιότυπο στον οικισμό, το κάτω στον αστικό ιστό.

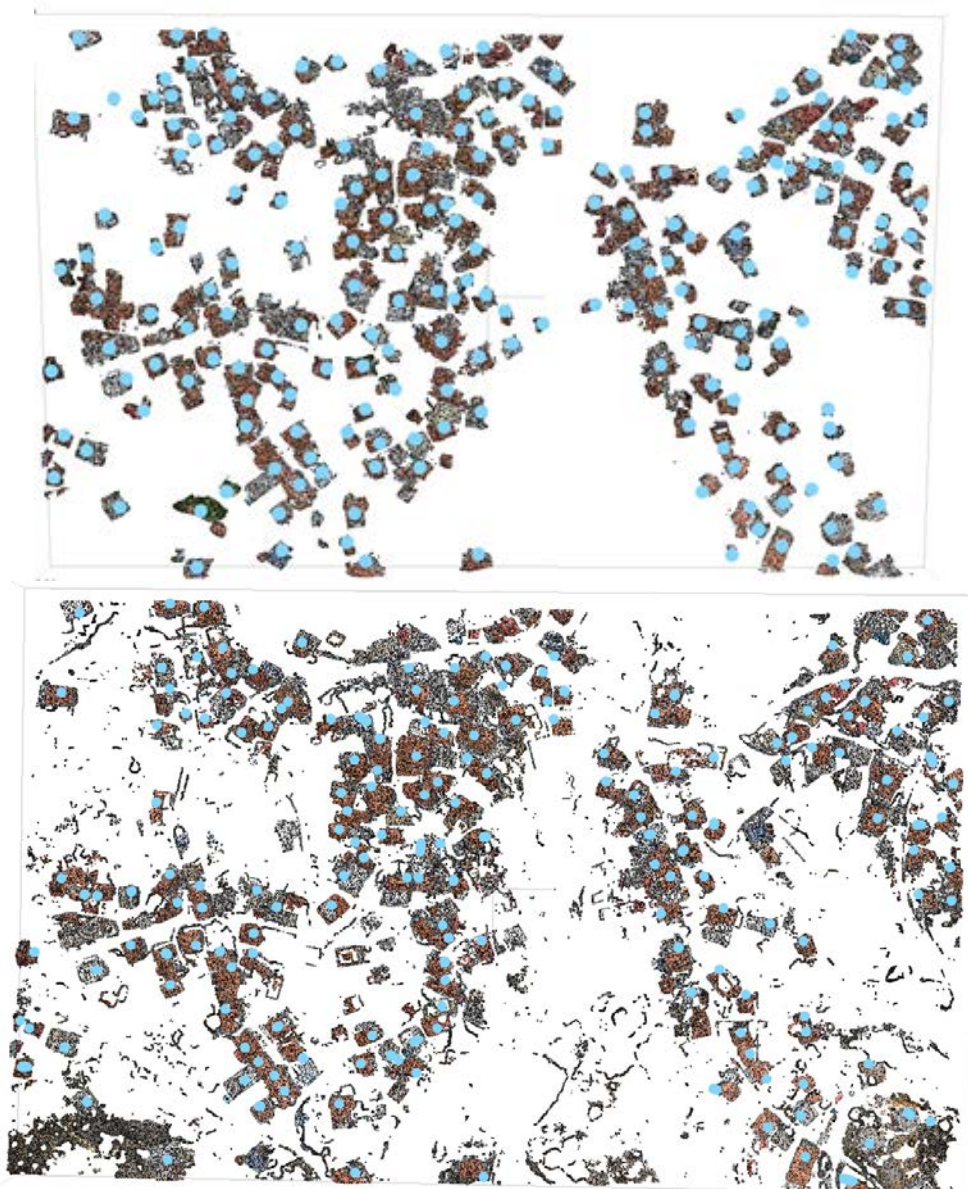


Εικόνα 3.26: Ανάθεση σημείων - κτιρίων στην κλάση "κτίρια", το πάνω στιγμιότυπο στον οικισμό, το κάτω στον αστικό ιστό.

Έτσι, είναι δυνατόν να γίνει αξιολόγηση με μετρήσιμα στοιχεία. Για το πρώτο σετ δεδομένων που αφορά τον οικισμό, το 14.8% των σημείων της ταξινόμησης που αντιστοιχούν σε κτίρια αποτελεί θόρυβο. Από το τελικό groundtruth που δημιουργήθηκε, το 10.6% των σημείων των κτιρίων ανατέθηκε στη κλάση των κτισμάτων χειροκίνητα (Εικ. 3.27). Επίσης, τα κτίρια που σχηματίζονται από την αυτόματη ταξινόμηση καταμετρήθηκαν και προέκυψαν 182, από τα 203 τα οποία καταμετρήθηκαν συνολικά στο groundtruth. Προκύπτει δηλαδή μια επιτυχία της τάξης του 89.7% (Εικ. 3.28).

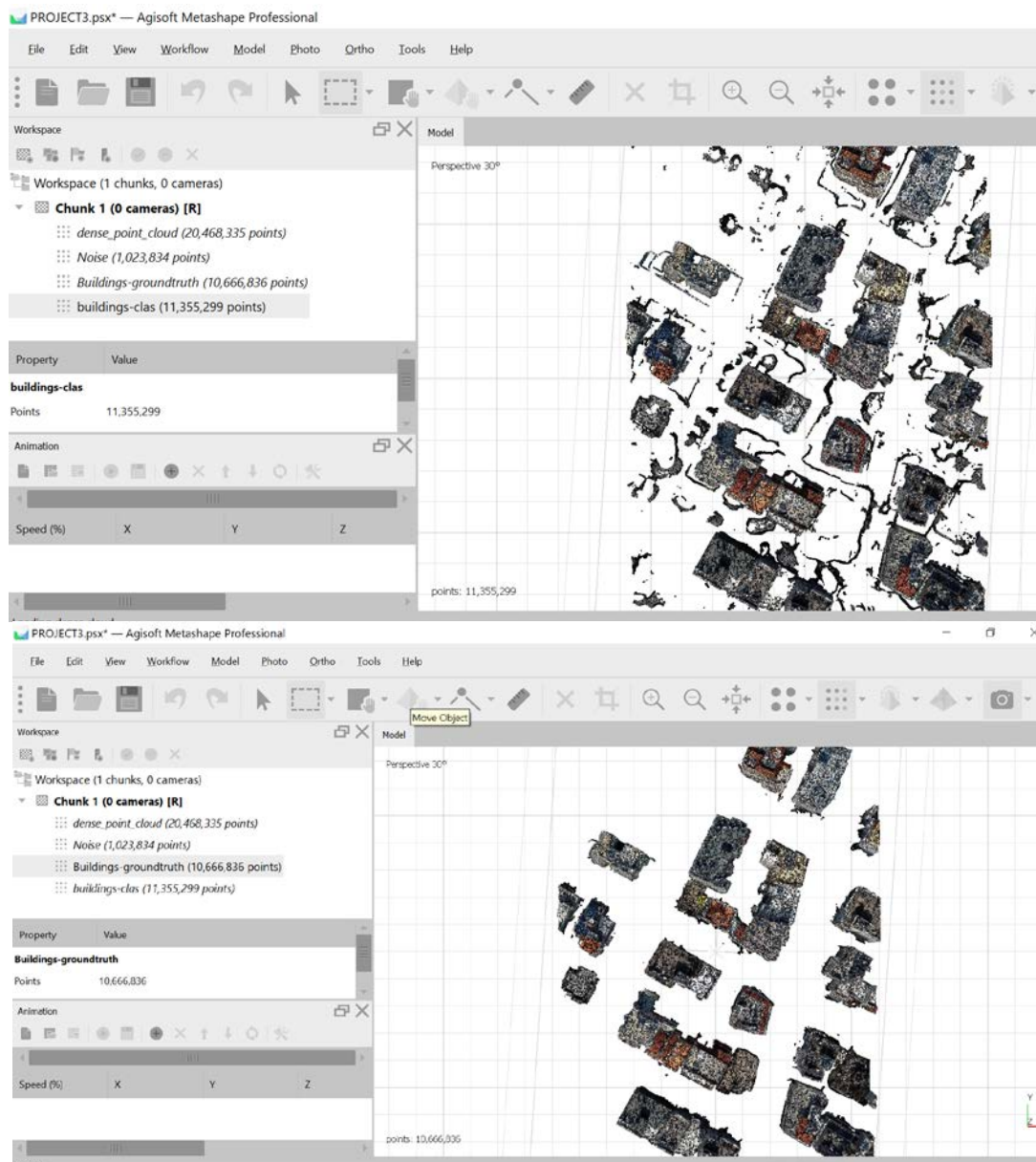


Εικόνα 3.27: Στο πάνω στιγμιότυπο τα κτίρια της αυτόματης ταξινόμησης στον οικισμό. Στο κάτω, στον αστικό ιστό. Στο υπόμνημα αριστερά κάθε εικόνας αναφέρεται ο αριθμός των σημείων.

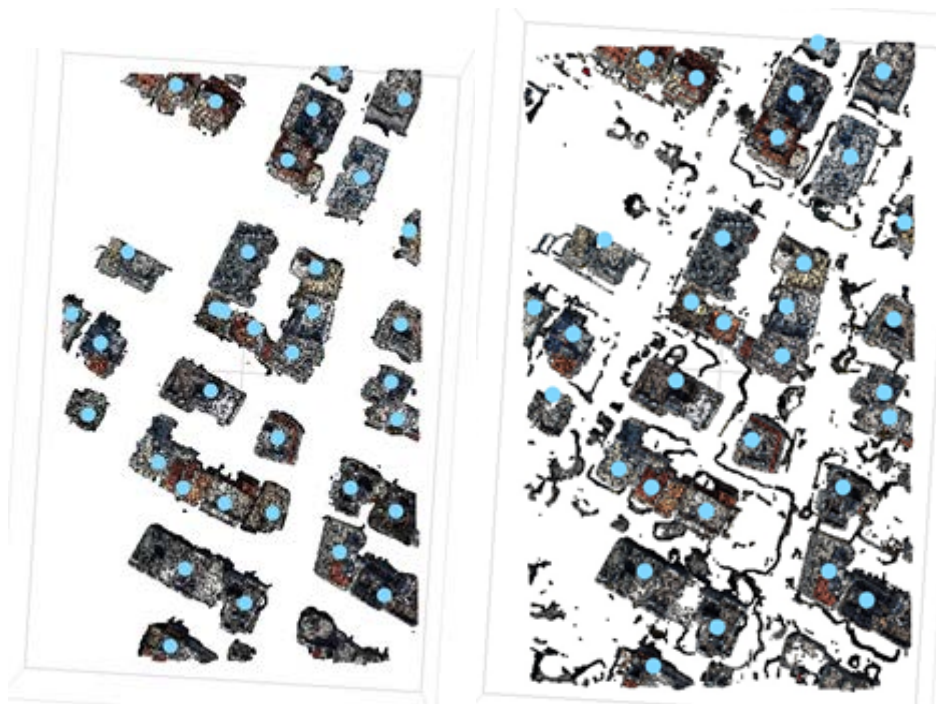


Εικόνα 3.28: Η πάνω εικόνα δείχνει τα μετρημένα σπίτια στο *groundtruth*, η κάτω στο πυκνό αυτόματα ταξινομημένο νέφος. Και οι δύο εικόνες αναφέρονται στον οικισμό.

Αντίστοιχα, για το δεύτερο σετ δεδομένων που αφορά τον αστικό ιστό, το 9% των σημείων της ταξινόμησης που αντιστοιχούν σε κτίρια αποτελεί θόρυβο. Από το τελικό *groundtruth* που δημιουργήθηκε, το 3.1% των σημείων των κτιρίων ανατέθηκε στη κλάση των κτισμάτων χειροκίνητα (Εικ. 3.29). Επίσης, τα κτίρια που σχηματίζονται από την αυτόματη ταξινόμηση καταμετρήθηκαν και προέκυψαν 32, από τα 34 τα οποία καταμετρήθηκαν συνολικά στο *groundtruth*. Προκύπτει δηλαδή μια επιτυχία της τάξης του 94.1% (Εικ. 3.30).



Εικόνα 3.29: Πάνω τα κτίρια της αυτόματης ταξινόμησης, κάτω το groundtruth για τον αστικό ιστό. Στο υπόμνημα αριστερά κάθε εικόνας αναφέρεται ο αριθμός των σημείων.



Εικόνα 3.30: Η αριστερή εικόνα δείχνει τα μετρημένα σπίτια στο groundtruth, η δεξιά στο πυκνό αυτόματα ταξινομημένο νέφος. Και οι δύο εικόνες αναφέρονται στον αστικό ιστό.

Προκύπτουν εντέλει, κάποια συμπεράσματα που αφορούν τόσο τη σύγκριση μεταξύ των δύο λογισμικών, όσο και σε σχέση με την πραγματική κατάσταση.

- Σε σχέση με το λογισμικό Arcgis 10.5, το Agisoft είναι πιο αξιόπιστο, τόσο στην επεξεργασία όσο και στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Κάτι το οποίο φαντάζει λογικό εφόσον ειδικεύεται στην επεξεργασία νεφών σημείων, και ειδικότερα αυτών που προκύπτουν φωτογραμμετρικά.
- Όπως προκύπτει και από τα παραπάνω στοιχεία, στην περίπτωση της αστικής περιοχής τα αποτελέσματα της ταξινόμησης είναι σαφώς καλύτερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το νέφος σημείων ήταν πιο πυκνό, τα κτίρια ψηλότερα, ο θόρυβος και η βλάστηση περιορισμένα σε σχέση με το σετ σημείων του οικισμού.
- Φαίνεται ότι τα περισσότερα κτίρια εντοπίστηκαν επιτυχώς στο Agisoft. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις παραμέτρους μόνο στην ταξινόμηση των σημείων εδάφους, κάτι το οποίο όμως είναι απαραίτητο για να γίνει σωστά η αυτόματη ταξινόμηση.
- Η αυτόματη ταξινόμηση γίνεται με τεχνικές εκμάθησης μηχανής, οι λεπτομέρειες των οποίων δεν διευκρινίζονται και ο χρήστης δεν έχει έλεγχο της ταξινόμησης παρά μόνο των αποτελεσμάτων της.

- Ο θόρυβος ο οποίος υπάρχει ανά περιπτώσεις μπορεί να απαλειφθεί και με άλλους αυτόματους ή ημιαυτόματους τρόπους.

4. ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ MAPPLE - POLYFIT

4.1. Εισαγωγή στη μεθοδολογία

Η μοντελοποίηση και η ανακατασκευή των κτιρίων πραγματοποιήθηκε στα ελεύθερα λογισμικά Marple και PolyFit. Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του Marple (ημερομηνία έκδοσης 08/03/2019), αλλά όχι και του PolyFit. Η τελευταία έκδοση του PolyFit ήταν η v1.4 για Windows, η οποία είχε προβλήματα λειτουργίας. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία έγινε στην αμέσως προηγούμενη έκδοση η οποία λειτουργούσε κανονικά (έκδοση v1.3 για Windows).

Πρόκειται για ελεύθερα λογισμικά που έχει διαθέσει μέσω GitHub ο Liangliang Nan, βοηθός καθηγητή στην ομάδα Γεωπληροφορικής της Σχολής Αρχιτεκτονικής και Δομημένου Περιβάλλοντος του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Delft. Δεν χρειάζονται εγκατάσταση στον υπολογιστή, εκτελούνται απλώς ως αρχεία επέκτασης «.exe».

Στην ανάλυση της βιβλιογραφικής έρευνας πραγματοποιήθηκε στο πρώτο κεφάλαιο έγινε ανάλυση της έρευνας των Ozdemir & Remondino (2018), όπου εξετάζονται η ταξινόμηση και η κατάτμηση του τρισδιάστατου νέφους σημείων με συνδυασμό μεθόδων εκμάθησης μηχανής και τηλεπισκόπησης, ενώ στη συνέχεια ανακατασκευάζονται τα κτίρια με τις εφαρμογές Marple και Polyfit.

Σε αυτή τη φάση της εργασίας, όπου έχει γίνει η κατάτμηση και η ταξινόμηση του νέφους σημείων, τα αποτελέσματα από το Agisoft Metashape χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά στα δύο λογισμικά μοντελοποίησης και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε διάφορα κτίρια έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης ανταποκρίνονται στην υφιστάμενη κατάσταση.

Το Polyfit είναι ένα ελεύθερο λογισμικό το οποίο συμπεριλαμβάνει μια σειρά από λειτουργίες για την ανακατασκευή πολυγωνικών επιφανειών από νέφη σημείων. Διαφέρει από άλλες κλασικές μεθόδους επειδή δεν εστιάζει μόνο στην ακρίβεια της εξαγωγής γεωμετρικών πρωτογενών στοιχείων, αλλά δίνει έμφαση στην τομή και τον συνδυασμό διαφορετικών επιπέδων.

Η τακτική βασίζεται στην υπόθεση και την επιλογή των κατάλληλων επιπέδων για την ανακατασκευή ενός μοντέλου. Αρχικά δημιουργείται ένα σετ από υποψήφια επίπεδα από την τομή των πρωτογενών στοιχείων, και στη συνέχεια επιλέγεται ένα βέλτιστο υποσύνολο από τα υποψήφια επίπεδα μέσω μεθόδων βελτιστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές εισάγουν πολλαπλούς περιορισμούς που εξαναγκάζουν το μοντέλο επιφανειών να είναι λεπτομερές και ταυτόχρονα να μην έχει κενά, να είναι δηλαδή στεγανό και συμπαγές.

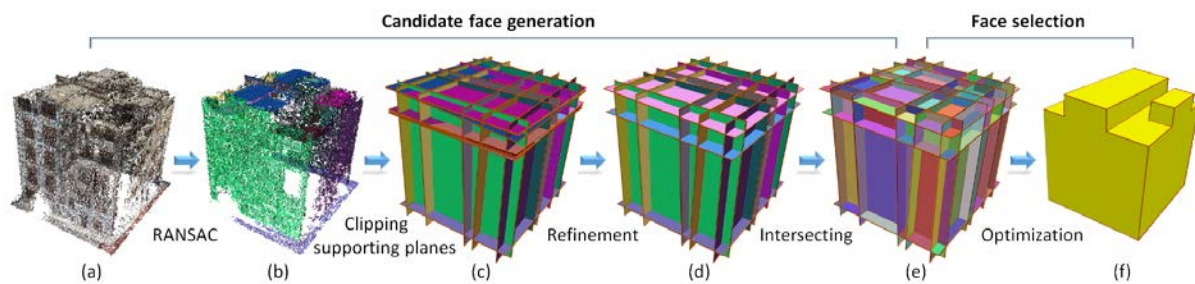
Το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή μοντέλων μικρού όγκου δεδομένων ή αντικειμένων με επίπεδες επιφάνειες. Οι τρεις βασικές απαιτήσεις που χρειάζεται να ικανοποιούνται για την ανακατασκευή είναι να διατηρηθούν οι βασικές ακμές του αντικειμένου που καθορίζουν το σχήμα του, να απαλειφθεί ο θόρυβος και κάποιες ακραίες τιμές που μπορεί να εντοπίζονται στο νέφος, και να καλυφθούν τα κενά εκεί όπου δεν υπάρχει αρκετή πληροφορία.

Η μέθοδος που εξετάζεται μπορεί ουσιαστικά να χωριστεί σε δύο βασικά σκέλη. Το πρώτο είναι η δημιουργία των υποψήφιων επιπέδων. Αρχικά γίνεται κατάτμηση του νέφους σημείων με τον αλγόριθμο RANSAC.

Επειδή, όπως αναφέρθηκε, το νέφος συμπεριλαμβάνει θόρυβο και κενά, επαναπροσδιορίζονται τα επίπεδα αυτά τμήματα, με επαναληπτική συνένωση επιπέδων ανά ζεύγη, τα οποία αντιστοιχούν στα τμήματα του νέφους, και με προσαρμογή καινούργιων επιπέδων. Στη συνέχεια γίνεται αποκοπή των επιπέδων αυτών με την βοήθεια ενός κανάβου που ορίζεται στο νέφος.

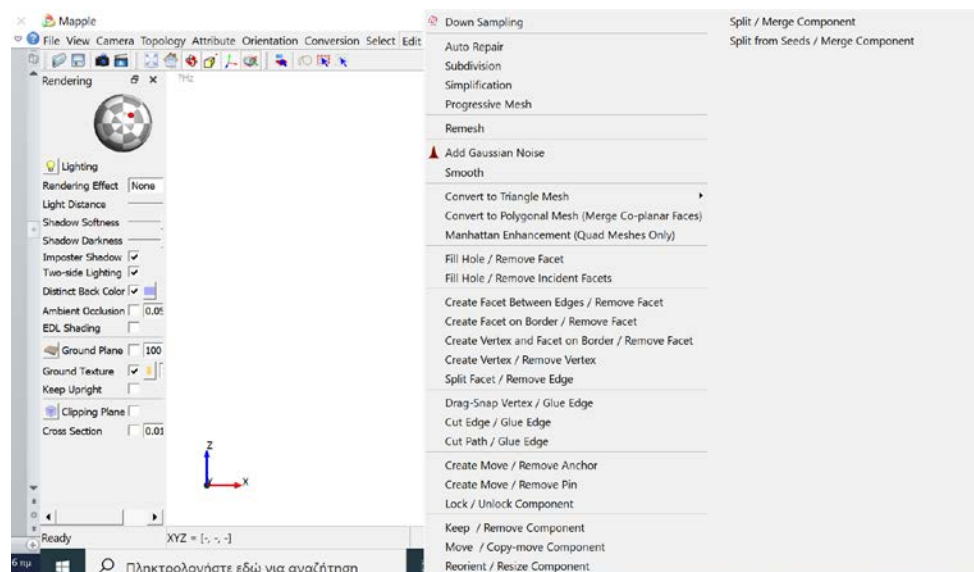
Το δεύτερο σκέλος είναι η επιλογή των επιπέδων για την αναπαράσταση του μοντέλου. Για να είναι λειτουργικός ο αλγόριθμος σε σχέση με τα εκάστοτε δεδομένα, η επιλογή γίνεται σε συνάρτηση με τρεις βασικές παραμέτρους: την προσαρμογή των δεδομένων, την κάλυψη σημείων και την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Ο αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί ως μια σειρά εργασιών (Εικ. 4.1) στις δύο αυτές φάσεις, της κατασκευής υποψήφιων επιπέδων και της επιλογής των κατάλληλων που θα αποτελέσουν το μοντέλο που θέλει να ανακατασκευάσει ο χρήστης.



Εικόνα 4.1: Σειρά εργασιών: (a) Νέφος Σημείων, (b) Επίπεδα τμήματα νέφους, (c) βοηθητικά επίπεδα των τμημάτων, (d) επίπεδα που προκύπτουν από συγχώνευση βοηθητικών επιπέδων (e), υποψήφιες προσόψεις αντικειμένου, (f) τελικό μοντέλο.

Στο πρώτο σκέλος του αλγορίθμου, την **εξαγωγή επιπέδων με RANSAC**, γίνεται εντοπισμός των επιπέδων τμημάτων $S = \{s_i\}$ από το νέφος σημείων «P» (Εικ. 4.1, b). Αυτή η κατάτμηση του νέφους και η ομαδοποίηση των σημείων γίνεται με το Mapple. Το Mapple είναι μία εφαρμογή για την προβολή και την επεξεργασία πυκνών νεφών σημείων. Εκτός από τη συγκεκριμένη λειτουργία στην οποία αξιοποιείται στην παρούσα εργασία, το λογισμικό αυτό επιτρέπει στο χρήστη να υπολογίσει στοιχεία που αφορούν τον προσανατολισμό των σημείων και άλλων βασικών χαρακτηριστικών τους, να επιλέξει ή να διαγράψει ομάδες σημείων και να επανακατασκευάσει το νέφος (μείωση σημείων, εξομάλυνση, προσθήκη Γκαουσιανού θορύβου, αυτόματο γέμισμα στα κενά, επεξεργασία σημείων, ακμών, επιφανειών).



Εικόνα 4.2: Επεξεργασία νέφους στο Mapple.

Με το Marple μπορεί να γίνει εξαγωγή των πρωτογενών στοιχείων, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια στο PolyFit για την μοντελοποίηση. Σε αυτή τη φάση δηλαδή γίνεται η κατάτμηση του νέφους με τη βοήθεια του αλγορίθμου Ransac, που αξιοποιεί το λογισμικό.

Το s_i είναι ένα σύνολο σημείων που προκύπτει από την κατάτμηση. Οι αποστάσεις από ένα επίπεδο δεν μπορούν να ξεπερνούν το κατώφλι «ε» και κάθε σημείο μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα μόνο επίπεδο. Αυτό αναφέρεται ως βοηθητικό επίπεδο που αντιστοιχεί σε ένα σύνολο σημείων s_i . Με τον τρόπο αυτό **γίνεται η προσαρμογή των κατάλληλων επιπέδων** αντίστοιχα τμήματα που προσδιορίστηκαν αρχικά (Εικ. 4.1, c).

Στη συνέχεια είναι απαραίτητος ο **επαναπροσδιορισμός των επιπέδων**, καθώς πολλά από αυτά έχουν δημιουργηθεί κατά λάθος, εξαιτίας της ύπαρξης θορύβου και ακραίων τιμών στο νέφος. Ειδικά όταν το νέφος προέρχεται από τεχνικές SFM, ο αλγόριθμος RANSAC μπορεί εξαιτίας του θορύβου να αναπαράγει επίπεδα τυχαίου προσανατολισμού τα οποία προέρχονται από λιγοστά σημεία και στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι η ανακατασκευή “εξογκωμάτων” που δεν ανταποκρίνονται στο πραγματικό μοντέλο, ενώ συχνά εμποδίζεται η ικανοποίηση των κατάλληλων προϋποθέσεων που έχουν τεθεί έτσι ώστε το μοντέλο να είναι λεπτομερές και συμπαγές.

Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται σε δύο βήματα. Αρχικά υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα επίπεδα ανά ζεύγη. Ξεκινώντας από το ζεύγος των επιπέδων που σχηματίζει τη μικρότερη γωνία γίνεται έλεγχος στα δύο επίπεδα (s_i, s_j) αν τηρούνται δύο συνθήκες. Πρέπει η γωνία που σχηματίζουν να είναι μικρότερη από ένα κατώφλι ($\text{angle}(s_i, s_j) < \theta_t$). Στη συνέχεια, ο αριθμός των κοινών σημείων που υποστηρίζουν και τα δύο βοηθητικά επίπεδα πρέπει να ξεπερνάει ένα κατώφλι N_t το οποίο έχει οριστεί. Οι τιμές που έχουν επιλεγεί ως κατώφλια για τον αλγόριθμο είναι σταθερές και δεν ρυθμίζονται από το χρήστη. Είναι $\theta_t=10^0$ και $N_t = \min(|s_i|, |s_j|)/5$, όπου $|s_i|$ και $|s_j|$ ο αριθμός των σημείων των αντίστοιχων επιπέδων.

Στην περίπτωση όπου τηρούνται και οι δύο συνθήκες, γίνεται συνένωση των επιπέδων με τη Μέθοδο Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA). Αυτή η διαδικασία

επαναλαμβάνεται έως ότου δεν γίνεται να συνενωθούν άλλα επίπεδα. Οι τιμές που έχουν επιλεχθεί ως κατώφλια για τον αλγόριθμο είναι σταθερές και δεν ρυθμίζονται από το χρήστη. Είναι $\theta_i=10^0$ και $N_i = \min(|s_i|, |s_j|)/5$, όπου $|s_i|$ και $|s_j|$ ο αριθμός των σημείων των αντίστοιχων επιπέδων. Από την επαναληπτική αυτή διαδικασία προκύπτουν τα βοηθητικά επίπεδα του μοντέλου στην τελική τους μορφή (Εικ. 4.1, d).

Μετά από την συνένωση των επιπέδων, **εξετάζεται η τομή των επιπέδων ανά ζεύγη** για να οριστούν οι υποψήφιες όψεις που θα αποτελέσουν το τελικό μοντέλο που πρέπει να ανακατασκευαστεί (Εικ. 4.1, e). Πρέπει λοιπόν να γίνει αποκοπή των βοηθητικών επιπέδων από τον κάναβο που έχει οροθετηθεί στο νέφος. Μετά από αυτό ο αλγόριθμος κρατάει τα επίπεδα που προκύπτουν από την τομή των κομμένων επιπέδων ανά ζεύγη.

Σε αυτό το σημείο μπορούν να δημιουργηθούν περιττά επίπεδα τα οποία δεν υποστηρίζονται από σημεία του νέφους ή αντιστοιχούν σε ελάχιστα σημεία, κάτι που αντιμετωπίζεται στην τελική φάση της αναπαράστασης του μοντέλου. Οι τομές των επιπέδων ανά ζεύγη συμπεριλαμβάνουν λοιπόν περιττή πληροφορία ακμών και επιπέδων. Κάθε ακμή όμως μπορεί να διαχωρίζει είτε τέσσερα υποψήφια επίπεδα ή δύο επίπεδα και να αποτελεί όριο. Αυτή η πληροφορία - όπως θα φανεί και στην συνέχεια - είναι σημαντική για να εξασφαλιστούν οι περιορισμοί που έχουν προαναφερθεί για το μοντέλο.

Στο δεύτερο σκέλος, γίνεται η επιλογή των τελικών επιπέδων από τα υποψήφια επίπεδα (N) που ανακατασκευάστηκαν, με τρόπο τέτοιο που να αναπαριστάται με την καλύτερη ακρίβεια η γεωμετρία του αντικειμένου, και να τηρούνται οι περιορισμοί που αναφέρονται στη στεγανότητα και στην αποτύπωση των λεπτομερειών του.

Στο στάδιο αυτό της βελτιστοποίησης του αποτελέσματος (optimization) υπεισέρχονται οι παράμετροι της προσαρμογής των δεδομένων (data – fitting), της κάλυψης σημείων (point coverage) και της πολυπλοκότητας του μοντέλου (model complexity). Οι παράμετροι αυτές περιγράφονται με μαθηματικές – γεωμετρικές σχέσεις και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως δυαδικό και γραμμικό. Έστω ότι η μεταβλητή x_i μπορεί να πάρει την τιμή «1» αν μια υποψήφια όψη επιλέγεται και την

τιμή «0» στην περίπτωση που δεν επιλέγεται. Για να διατυπωθεί η συνθήκη η οποία πρέπει να τηρείται για την επιλογή των επιπέδων πρέπει να γίνει ανάλυση των τριών παραμέτρων.

Η πρώτη παράμετρος (data – fitting) αξιολογεί την προσαρμοστικότητα των επιπέδων στο νέφος σημείων σε ένα συγκεκριμένο διάστημα εμπιστοσύνης. Μετράει ένα σταθμισμένο ποσοστό εμπιστοσύνης των σημείων που δεν συμβάλλουν στην τελική ανακατασκευή του μοντέλου και περιγράφεται με την εξής σχέση:

$$E_f = 1 - \frac{1}{|P|} \sum_{i=1}^N x_i \cdot support(f_i)$$

όπου $|P|$ ο αριθμός όλων των σημείων και $support(f_i)$ είναι το διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε σημείο ξεχωριστά σε σχέση με τα γειτονικά σε αυτό σημεία και περιγράφεται με τη σχέση:

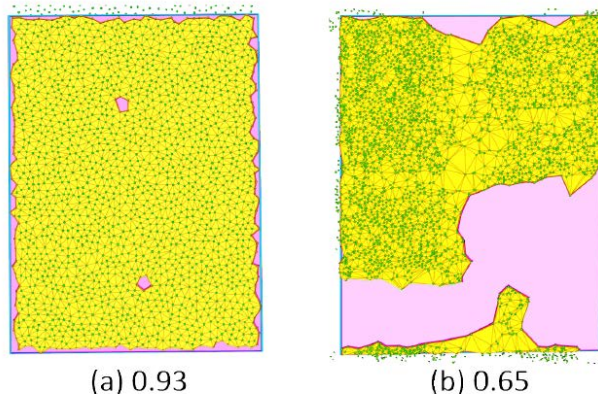
$$support(f) = \sum_{p, f | dist(p, f) < \varepsilon} \left(1 - \frac{dist(p, f)}{\varepsilon} \right) \cdot conf(p)$$

όπου $dist(p, f)$ η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ ενός σημείου p και ενός επιπέδου f η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από μία προκαθορισμένη τιμή « ε ». Ο δείκτης αυτός μετράει την ποιότητα του νέφους στην περιοχή που αντιστοιχεί στο σημείο p και υπολογίζεται από έλεγχο που πραγματοποιείται στους πίνακες συμμεταβλητότητας των γειτονικών σημείων σε τρεις διαφορετικές στατικές κλίμακες (i). Δίνεται από τον τύπο

$$conf(p) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(1 - \frac{3\lambda_i^1}{\lambda_i^1 + \lambda_i^2 + \lambda_i^3} \right) \cdot \frac{\lambda_i^2}{\lambda_i^3}$$

όπου $\lambda_i^1 \leq \lambda_i^2 \leq \lambda_i^3$ είναι οι τρεις ιδιοτιμές του πίνακα συμμεταβλητότητας σε κλίμακα i . Ο όρος $conf(p)$ περιλαμβάνει δύο γεωμετρικές ιδιότητες κοντά στο σημείο p . Η πρώτη ιδιότητα περιγράφεται με τη σχέση $1 - 3\lambda^1 / (\lambda^1 + \lambda^2 + \lambda^3)$ και αξιολογεί κατά πόσο ένα κοντινό εφαπτόμενο επίπεδο προσαρμόζεται σωστά στο σημείο p και παίρνει τιμές από 0 έως 1, με το 1 να υποδεικνύει την τέλεια προσαρμογή του επιπέδου. Η δεύτερη ιδιότητα περιγράφεται με τη σχέση λ^2 / λ^3 και αξιολογεί την ομοιομορφία στην δειγματοληψία στην περιοχή του δείγματος. Κάθε ιδιοτιμή μπορεί να πάρει τιμές $0 < \lambda_i < 1$.

Η παράμετρος data – fitting μπορεί να ευνοήσει την επιλογή επιπέδων που βρίσκονται κοντά στα σημεία και το νέφος σημείων να είναι πυκνό και ομοιόμορφο. Μπορεί να πάρει τιμές $0 < E_f < 1$.

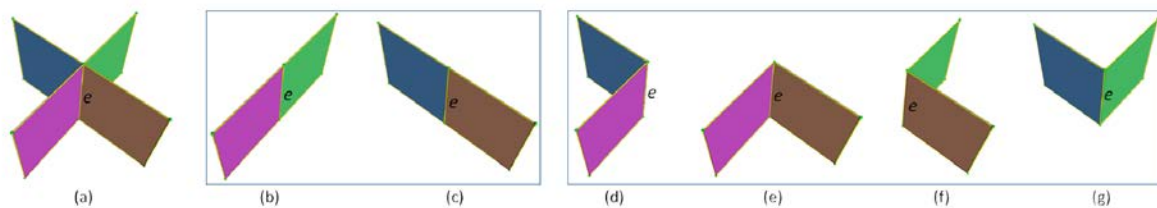


Εικόνα 4.3: Δύο παραδείγματα για την κάλυψη. Τα πλέγματα a-shapes απεικονίζονται με κίτρινο και οι υποψήφιες όψεις με μοβ. Η κάθε τιμή αντιστοιχεί στην κάλυψη σε κάθε όψη.

Η πρώτη παράμετρος δεν είναι ικανή να αντιμετωπίσει τα κενά που υπάρχουν στο μοντέλο εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων. **Η δεύτερη παράμετρος (model complexity)** είναι αυτή που μπαίνει στην εξίσωση για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα αυτό έτσι ώστε να προχωρήσει με μεγαλύτερη ευκολία η μοντελοποίηση απλούστερων δομών, όπως π.χ. μία μεγάλη επίπεδη περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κενά και οι προεξοχές σε ένα μοντέλο οδηγούν σε επιπρόσθετες ακμές, η παράμετρος αυτή προσδιορίζεται ως η αναλογία των ακμών στο μοντέλο με τον εξής τύπο:

$$E_m = \frac{1}{|E|} \sum_{i=1}^{|E|} \text{corner}(e_i)$$

Το $|E|$ υποδηλώνει τον συνολικό αριθμό των τεμνόμενων ανά ζεύγη επιπέδων στη φάση της επιλογής των υποψήφιων επιπέδων. Το $\text{corner}(e_i)$ είναι ένας δείκτης με τιμή που καθορίζεται από τον τρόπο που τέμνονται τα επίπεδα. Στην πρώτη περίπτωση, που τα επίπεδα σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 180° , γίνεται αναφορά σε επίπεδες ακμές e_i (Εικ. 4.4, σχήματα b,c) και στη δεύτερη περίπτωση σε αιχμηρές ακμές (Εικ. 4.4, σχήματα d-g). Ο δείκτης $\text{corner}(e_i)$ παίρνει τιμή 1 στην πρώτη περίπτωση και μηδενική τιμή στη δεύτερη περίπτωση.



Εικόνα 4.4: (a) Δύο επίπεδα τέμνονται με αποτέλεσμα να δημιουργούν τέσσερα νέα επίπεδα. Από το (b) μέχρι το (g) φαίνονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί που μπορούν να προκύψουν από την τομή τους.

Για τη διαχείριση του προβλήματος της έλλειψης δεδομένων, οι περιοχές που δεν καλύπτονται από ικανοποιητικό αριθμό σημείων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές. Για να μετρηθεί η κάλυψη των σημείων (**point coverage** - η τρίτη παράμετρος που εξετάζεται) που αντιστοιχεί σε επιφάνεια f_i γίνεται προβολή των σημείων που είναι σε απόσταση «ε» από την επιφάνεια. Τότε γίνεται εξαγωγή ενός πλέγματος σημείων M_i^α με την κατασκευή ενός δισδιάστατου σχήματος (α-shape) από τα σημεία που έχουν προβληθεί στο επίπεδο (Εικ. 4.3).

Το δισδιάστατο σχήμα που σχηματίζεται εξασφαλίζει πως οποιαδήποτε τριάδα σημείων με ακτίνα $r_c \leq \sqrt{\alpha}$ συνδέεται με ένα τριγωνικό επίπεδο. Εφόσον επιλεγεί η σωστή τιμή για την ακτίνα, το πλέγμα που δημιουργήθηκε μπορεί να αποτελέσει έναν αξιόπιστο δείκτη για την κάλυψη σημείων ανά επιφάνεια. Άρα, η παράμετρος αυτή μπορεί να περιγραφεί ως η αναλογία των περιοχών που έχουν λίγα σημεία, με τη σχέση:

$$E_c = \frac{1}{\text{area}(M)} \sum_{i=1}^N x_i \cdot (\text{area}(f_i) - \text{area}(M_i^\alpha))$$

όπου οι όροι $\text{area}(M)$, $\text{area}(f_i)$ και $\text{area}(M_i^\alpha)$ υποδηλώνουν το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας του μοντέλου, της υποψήφιας επιφάνειας και την προβολή της όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αντίστοιχα. Η ακτίνα r_c επελέγη να είναι πενταπλάσια της πυκνότητας (P), η οποία είναι στην ουσία η μέση απόσταση από τους k εγγύτερους γείτονες (k=6).

Ο παρανομαστής του κλάσματος διασφαλίζει ότι η κάλυψη κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 0 και 1. Για να πραγματοποιηθούν όμως οι υπολογισμοί για το εμβαδόν και την κάλυψη με μεγαλύτερη ευκολία γίνεται αντικατάσταση της επιφάνειας του μοντέλου με το ευρύτερο κουτί που οριοθετεί το νέφος σημείων ($\text{area}(M) \approx \text{area}(\text{bbox}(P))$).

Με τις τρεις παραμέτρους που εξετάστηκαν το βέλτιστο σύνολο των επιπέδων μπορεί να επιλεγεί με ελαχιστοποίηση ενός αθροίσματος, με την επιλογή του καταλληλότερου βάρους για την κάθε μία, υπό αυστηρούς περιορισμούς οι οποίοι θα εξαναγκάζουν το μοντέλο να είναι συμπαγές χωρίς να χάνει την πληροφορία του.

Αναφέρθηκε και σε προηγούμενο σημείο πως μία ακμή μπορεί να συνδέει δύο ή τέσσερις επιφάνειες (Εικ. 4.4). Για να είναι το μοντέλο κλειστό και συμπαγές είναι αναγκαία και ικανή συνθήκη μία ακμή να συνδέει μόνο δύο γειτονικά επίπεδα. Επομένως, η τελική συνθήκη για την επιλογή των επιφανειών που απαρτίζουν το αντικείμενο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\min_x \lambda_f \cdot E_f + \lambda_m \cdot E_m + \lambda_c \cdot E_c$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in N(e_i)} x_j = 2 \text{ or } 0, & 1 \leq i \leq |E| \\ x_i \in \{0,1\}, & 1 \leq i \leq N \end{cases}$$

όπου το άθροισμα $\sum_{j \in N(e_i)} x_j$ μετράει τον αριθμό των επιπέδων που συνδέονται με μια ακμή e_i . Αυτό το άθροισμα μπορεί να πάρει είτε την τιμή 2, στην περίπτωση που επιλέγονται δύο επίπεδα, είτε την τιμή μηδέν όταν δεν επιλέγεται κανένα. Για να λυθεί το πρόβλημα που ορίζεται στην παραπάνω εξίσωση, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα έτοιμο πρόγραμμα επίλυσης μαθηματικών ζητημάτων (Gurobi optimization).

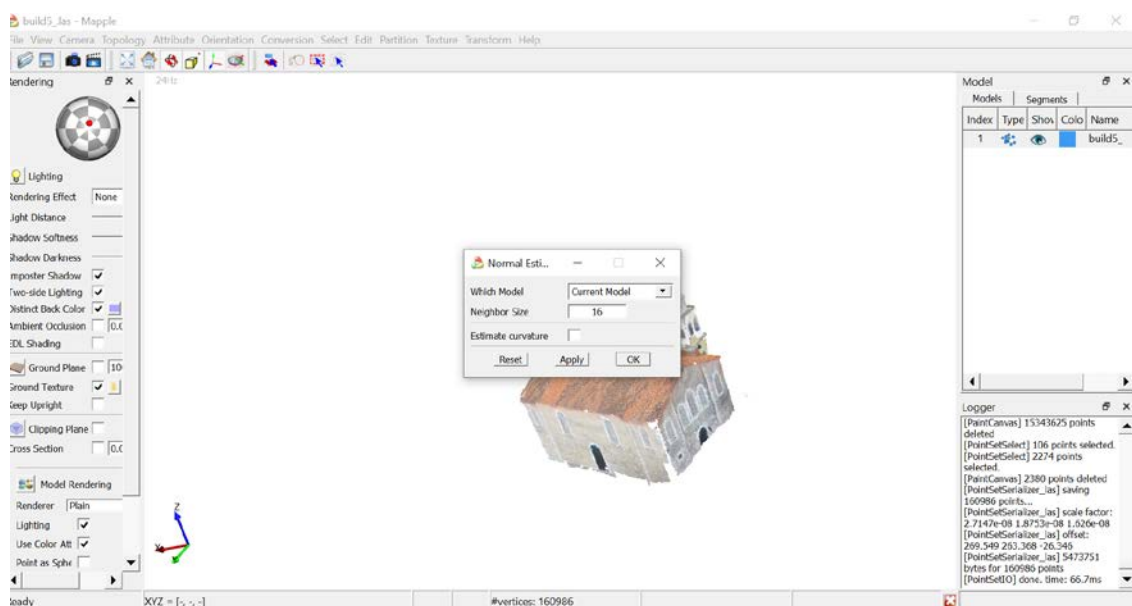
Αξίζει να σημειωθεί ότι το Polyfit έχει γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++, ενώ για την κατασκευή των δισδιάστατων επιφανειών α-shapes χρησιμοποιήθηκε η έτοιμη βιβλιοθήκη CGAL.

4.2. Μοντελοποίηση ανά κτίριο

Το στάδιο της μοντελοποίησης των κτισμάτων πραγματοποιήθηκε σε δύο σκέλη. Αρχικά η μεθοδολογία που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε ανά κτίριο, για το νέφος σημείων του οικισμού.

Το πρώτο ήταν ένα κτίριο με στέγη 4 επιπέδων και δίπλα της πλακοσκεπή, ενώ το δεύτερο ήταν ένα πιο ψηλό κτίριο, η εκκλησία του οικισμού, με πρόσθετη πληροφορία το καμπαναριό της. Στο Mapple, γίνεται η ομαδοποίηση των σημείων με τον αλγόριθμο του Ransac. Τα αρχεία που διαβάζει η εφαρμογή πρέπει να είναι σε μορφή .las. Έτσι, στο Agisoft έγινε εξαγωγή 2 κτιρίων σε αυτή τη μορφή, μόνο από την κλάση «κτίρια» που δημιουργήθηκε στην ταξινόμηση.

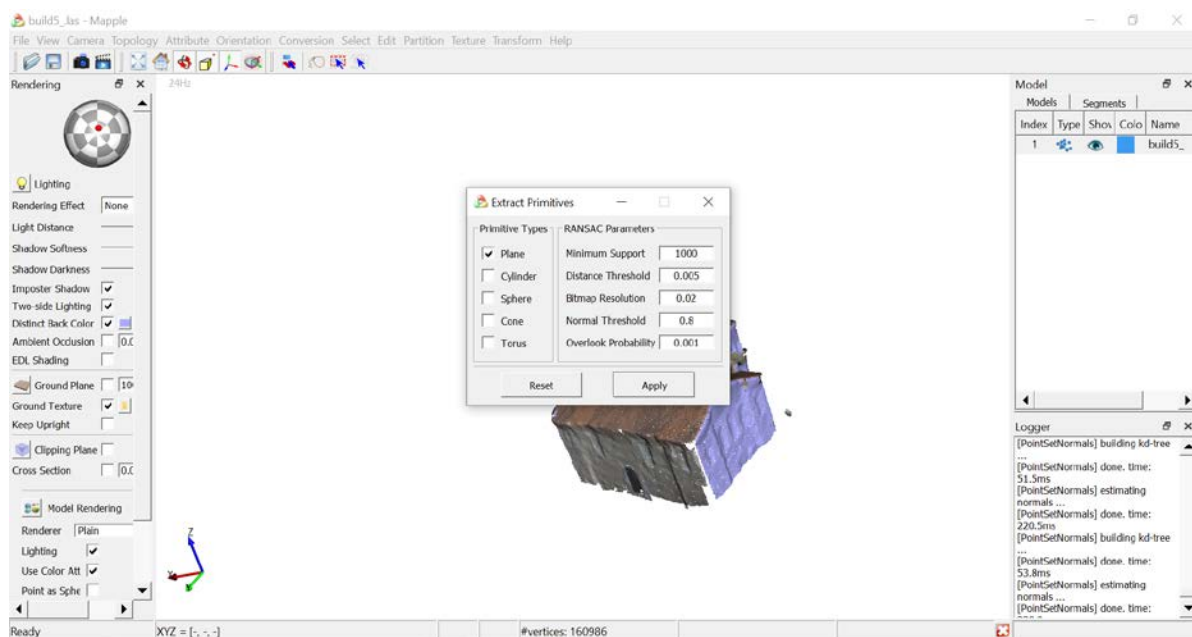
Για να γίνει η κατάτμηση του νέφους που αφορά το κτίριο, το πρόγραμμα πρέπει αρχικά να υπολογίσει τα διανύσματα των σημείων του νέφους, λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις των γειτονικών σημείων μεταξύ τους (Εικ. 4.5). Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ στο Agisoft η επεξεργασία έγινε στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ '87, η ίδια δυνατότητα δεν υποστηρίζεται στις εφαρμογές που εξετάζονται. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 4.5: Εκτίμηση διανυσμάτων εκκλησίας στο Mapple.

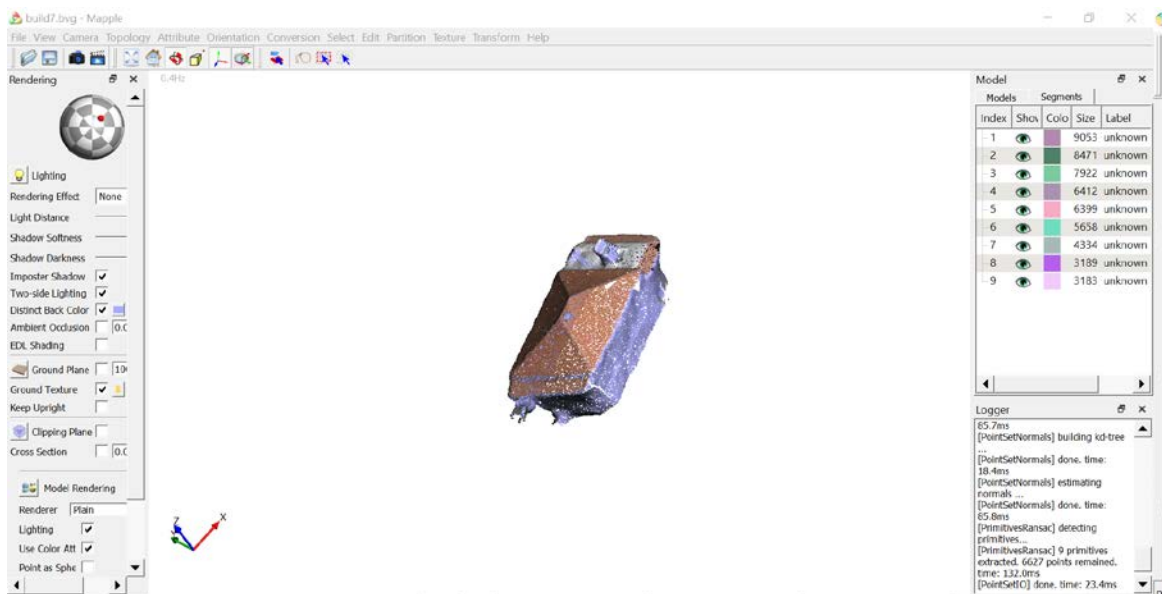
Στη συνέχεια, τα πρωτογενή στοιχεία υπολογίζονται με την επιλογή «κατάτμηση». Δίνεται η δυνατότητα επιλογής του είδους της επιφάνειας σύμφωνα με την οποία ο χρήστης θέλει να ομαδοποιήσει τα σημεία του νέφους. Στην περίπτωση που εξετάζεται επελέγη το απλό επίπεδο, ενώ οι παράμετροι του Ransac που υπήρχαν ως προεπιλογή δεν μεταβλήθηκαν. Οι δύο πρώτες παράμετροι του Ransac που ορίζονται στο Maple από το χρήστη προέκυψε ότι ήταν οι πιο καθοριστικές σε σχέση με το σωστό αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των σημείων.

Η πρώτη παράμετρος αφορά τον ελάχιστο αριθμό σημείων (Minimum Support) που μπορεί να έχει μία ομάδα σημείων. Το πρόγραμμα έχει ως προεπιλογή τον αριθμό 1000 για αυτή την παράμετρο. Η δεύτερη παράμετρος αφορά το κατώφλι της απόστασης (distance threshold), δηλαδή ποια είναι η μέγιστη απόσταση που μπορεί να απέχει ένα σημείο από το νοητό επίπεδο που προσαρμόζεται στα σημεία. Αυτή η απόσταση είναι προεπιλεγμένη στα 0.005 m. Οι εναλλαγές στις υπόλοιπες τρεις παραμέτρους (Bitmap resolution, Normal threshold, Overlook probability) δεν επηρέαζαν σε τόσο μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των σημείων.

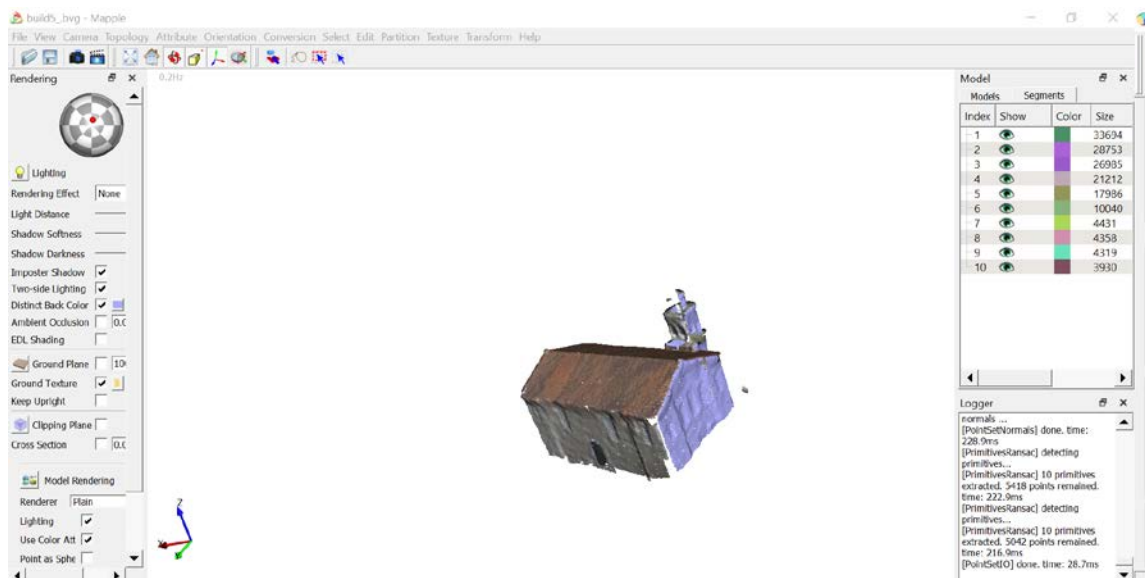


Εικόνα 4.6: Επιλογή παραμέτρων εκκλήσιδας για την κατάτμηση.

Στην περίπτωση του κτιρίου ο αλγόριθμος δημιούργησε 9 ομάδες σημείων και στην περίπτωση της εκκλησίας 10. Και οι δύο ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τις επίπεδες επιφάνειες που έχει το κάθε κτίριο. Τα αρχεία αποθηκεύτηκαν σε μορφή .bng για να μπορεί να γίνει η επεξεργασία στο PolyFit.



Εικόνα 4.7: Ομαδοποίηση σημείων πλακοσκεπούς.



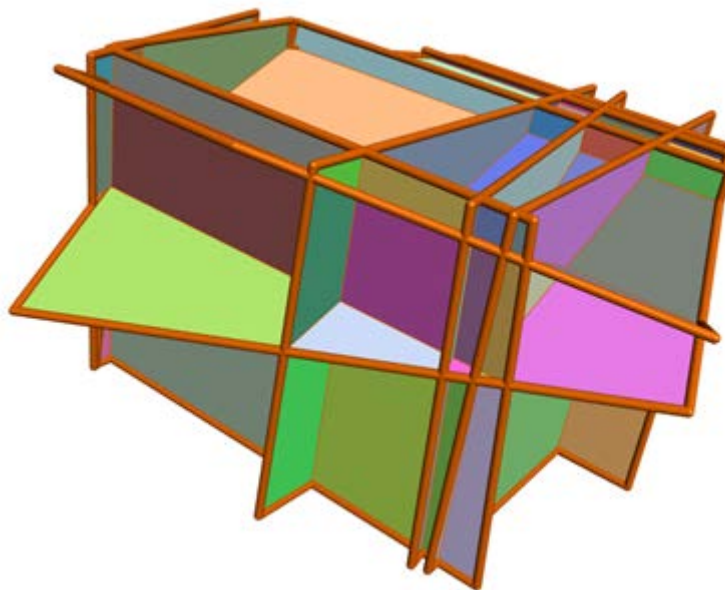
Εικόνα 4.8: Ομαδοποίηση σημείων εκκλησίας.

Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία στο PolyFit. Όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι μία εφαρμογή που χρησιμοποιείται για το τελικό στάδιο της μοντελοποίησης. Μετά από την επεξεργασία του από το Maple, δουλεύει σε 4 φάσεις.

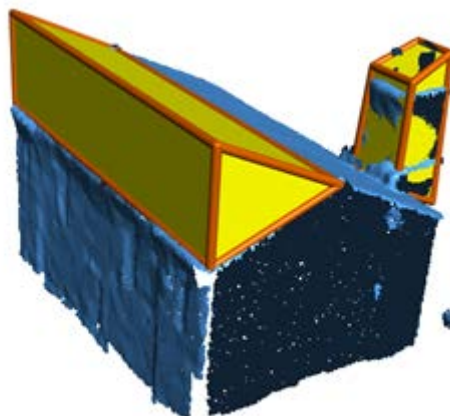
Αρχικά βελτιώνει το νέφος. Στη συνέχεια εντοπίζει τα υποψήφια επίπεδα που αντιστοιχούν στα σημεία που έχουν ομαδοποιηθεί, αποκόπτει τα βοηθητικά επίπεδα και τα επαναπροσδιορίζει. Μετά γίνεται συγχώνευση των βοηθητικών επιπέδων, σύμφωνα με τα επίπεδα εμπιστοσύνης που έχουν οριστεί λαμβάνοντας υπόψη την

προσαρμογή των επιπέδων, την επικάλυψη και την πολυπλοκότητα. Για τους τρεις αυτούς παράγοντες ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το βάρος που αντιστοιχεί στον κάθε ένα, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κτίσματος που αντιπροσωπεύεται. Τα βάρη δεν μεταβλήθηκαν στην επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε. Τελευταίο είναι το στάδιο της τελικής επιλογής των επιπέδων που αποτελούν το κτίσμα.

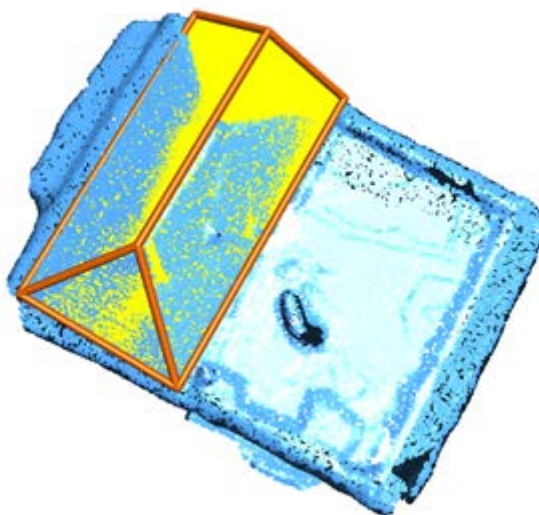
Στις πρώτες προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα δεν ήταν καλά, αρχικά φάνηκε οπτικά πως δεν είχαν μοντελοποιηθεί σωστά τα κτίρια. Στο απλό κτίριο μοντελοποιήθηκε μόνο τμήμα της σκεπής του και με λάθος τρόπο, ενώ στην εκκλησία μοντελοποιήθηκε σωστά το καμπαναριό και με λάθος τρόπο η στέγη της. Στην ουσία δηλαδή μοντελοποιήθηκαν 12 επιφάνειες στην εκκλησία (Εικ. 4.10), εκ των οποίων οι 7 μόνο ήταν σωστές, ενώ στο κτίσμα (Εικ. 4.11) 8 εκ των οποίων οι 2 μόνο ήταν σωστές.



Εικόνα 4.9: Υποψήφια επίπεδα εκκλησίας.



Εικόνα 4.10: Δημιουργία επιπέδων εκκλησίας.

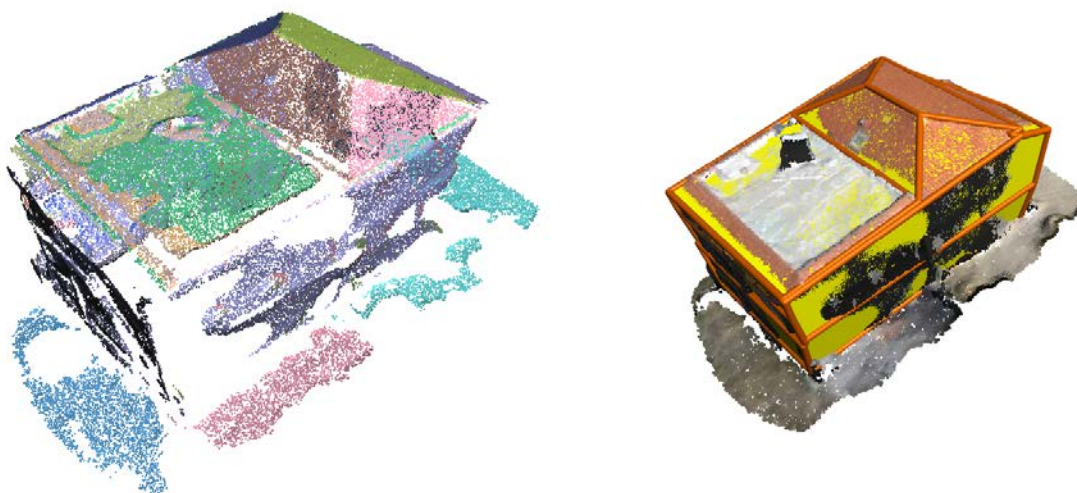


Εικόνα 4.11: Δημιουργία επιπέδων πλακοσκεπούς.

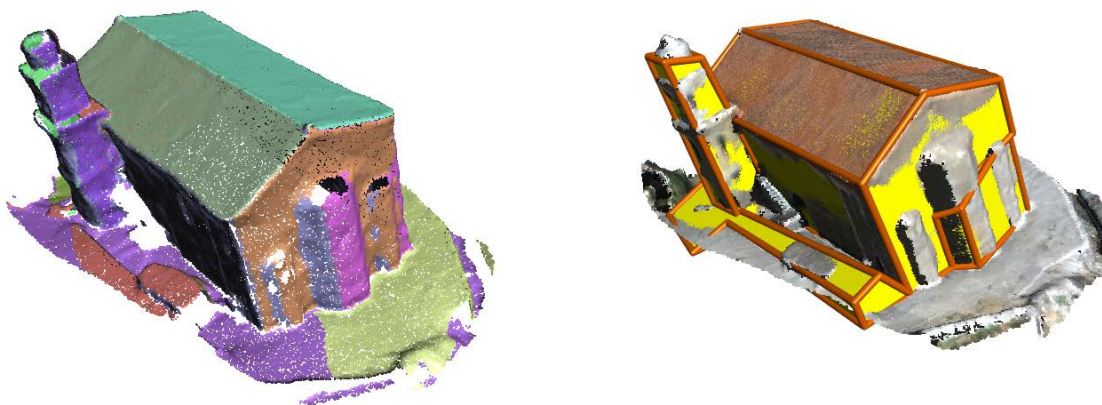
Το κύριο πρόβλημα ήταν πως τα κτίρια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν έλλειψη πληροφορίας, ειδικά στη βάση τους και περισσότερο στα πλαϊνά μέρη τους παρά στις σκεπές. Έτσι, πραγματοποιήθηκε ένα δεύτερο πείραμα με ένα κτίριο πιο απλό και την ίδια εκκλησία. Η εξαγωγή των δύο κτιρίων από το Agisoft Metashape πραγματοποιήθηκε μαζί με τα ground points.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι όσο μικρότερο είναι το minimum support στις επιλογές του Ransac, τόσο λιγότερες ομάδες σημείων χάνονται κατά την ομαδοποίησή τους στο Mapple. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκαν 500 σημεία για κάθε ελάχιστη επιφάνεια. Επιπλέον το κατώφλι της απόστασης ορίστηκε στην τιμή 0.0005 m, με αποτέλεσμα να μην ομαδοποιούνται σημεία που δεν ανήκουν στην πραγματικότητα σε κάποιο επίπεδο.

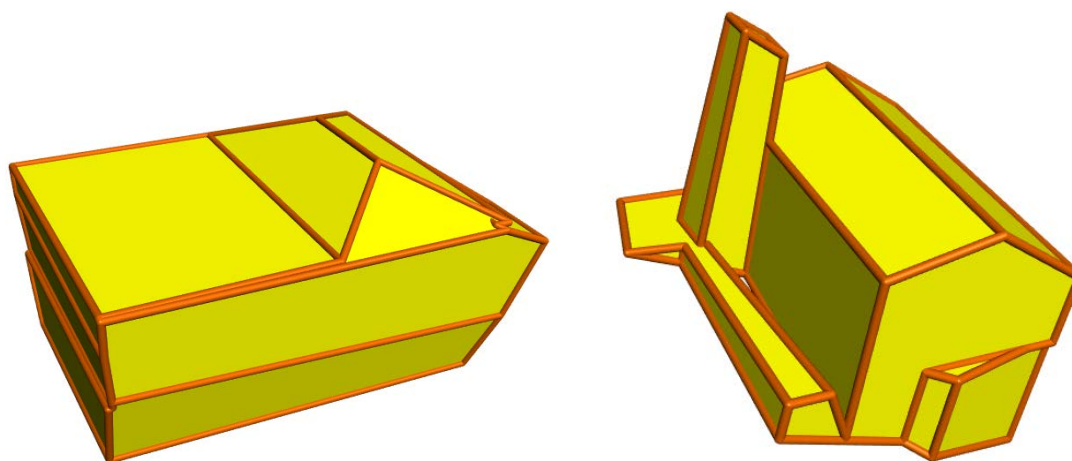
Από την ομαδοποίηση των σημείων και την επεξεργασία στο Marple δημιουργήθηκαν στο απλό κτίριο 27 ομάδες σημείων, ενώ στην εκκλησία 21 ομάδες σημείων. Στη συνέχεια, μοντελοποιήθηκαν στο PolyFit 27 επιφάνειες στο κτίριο και 21 στην εκκλησία.



Εικόνα 4.12: Επεξεργασία σε για το πλακοσκεπές στα δύο λογισμικά.



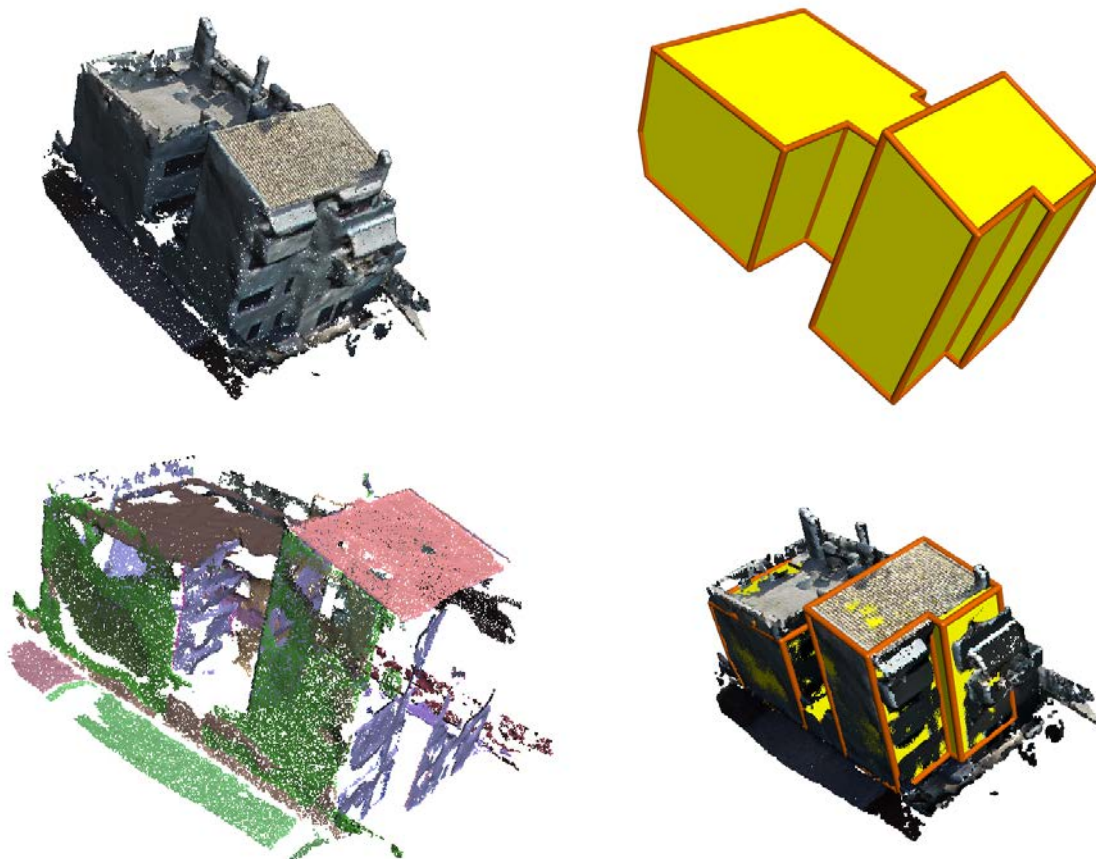
Εικόνα 4.13: Επεξεργασία για την εκκλησία στα δύο λογισμικά.



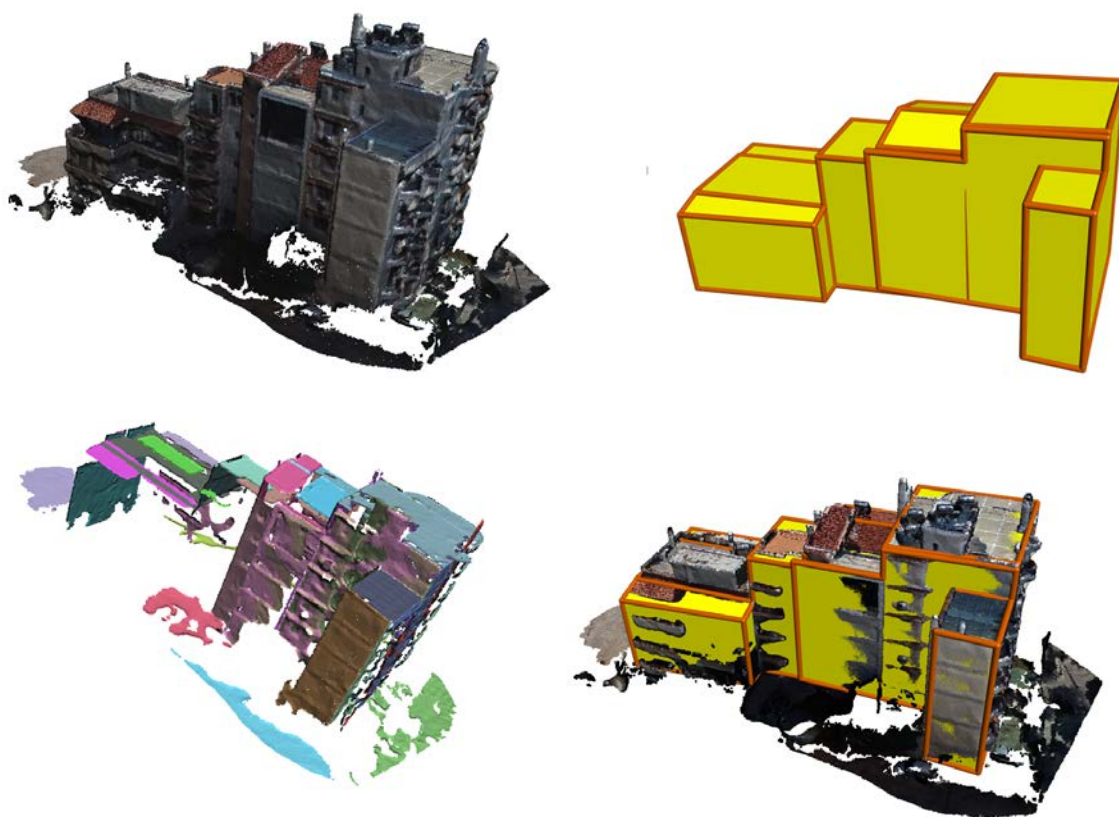
Εικόνα 4.14: Τα τελικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τα δύο κτίρια του οικισμού.

Επίσης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα κτίρια που αντιστοιχούν στην αστική περιοχή είναι ακόμα πιο εντυπωσιακά. Αυτό ισχύει γιατί τα κτίρια που αποτελούν την περιοχή είναι πιο πολύπλοκα και έχουν περισσότερες λεπτομέρειες, ακμές και επιφάνειες. Έγιναν αρκετές δοκιμές, και σε δύο από αυτά η επεξεργασία έγινε με την ίδια μεθοδολογία που αναφέρθηκε και προηγουμένως, με τη μόνη διαφορά στην επιλογή της παραμέτρου Minimum Support του αλγορίθμου Ransac.

Στο πρώτο κτίριο, ο αριθμός των ελάχιστων σημείων που μπορούν να αποτελέσουν μια συστάδα σημείων επιλέχτηκε στα 1000. Κατά την επεξεργασία στο Marple προέκυψαν 21 πρωτογενή παράγωγα. Στο δεύτερο κτίριο, ο αριθμός των ελάχιστων σημείων που μπορούν να αποτελέσουν μια συστάδα σημείων επιλέχτηκε στα 4000, καθώς η υπολογιστική ισχύς του υπολογιστή δεν μπορούσε να επεξεργαστεί το μέγεθος της πληροφορίας για 80 και πλέον ομάδες σημείων που προέκυπταν από την επιλογή 1000 για το Minimum Support. Κατά την επεξεργασία στο Marple προέκυψαν τελικά 33 πρωτογενή παράγωγα.



Εικόνα 4.15: Αποτελέσματα μοντελοποίησης πρώτου κτιρίου αστικής περιοχής.



Εικόνα 4.16: Αποτελέσματα μοντελοποίησης δεύτερου κτιρίου αστικής περιοχής.

4.3. Ταυτόχρονη μοντελοποίηση περισσότερων κτιρίων

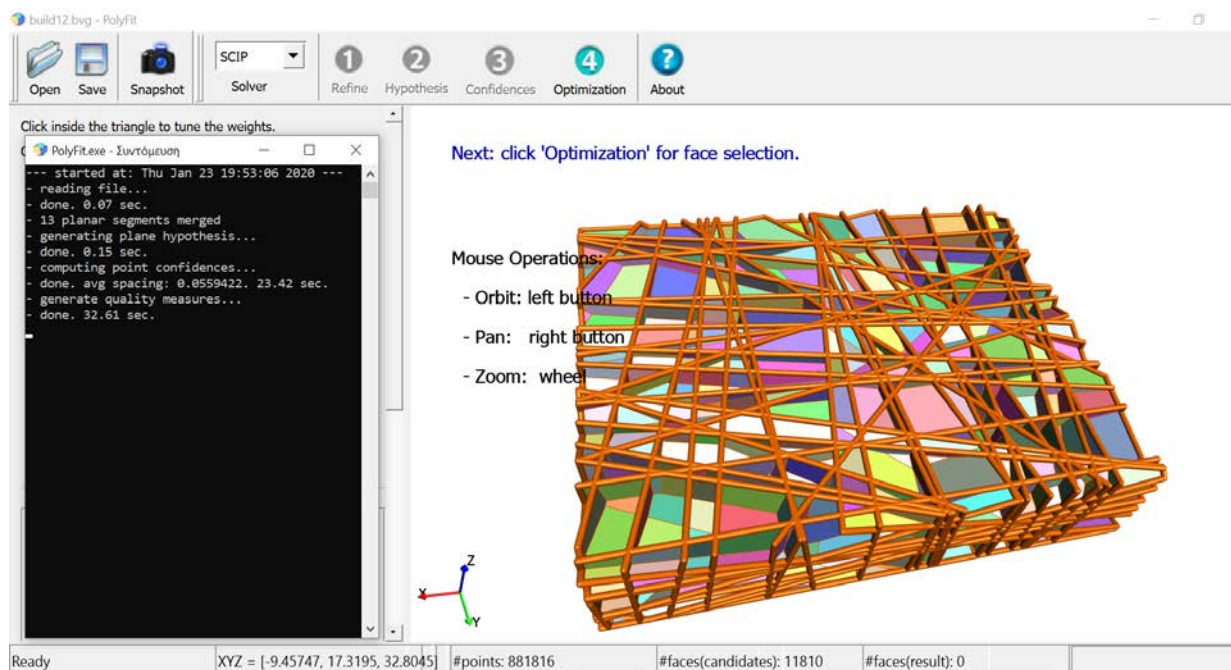
Το επόμενο βήμα ήταν η μοντελοποίηση στα λογισμικά Marple και PolyFit, αυτή τη φορά σε μεγαλύτερη κλίμακα. Στην ουσία έγινε αποκοπή και επεξεργασία σε μεγαλύτερες περιοχές για να ελεγχθεί εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αξιόλογα.

Αρχικά έγινε επεξεργασία για ένα κομμάτι του οικισμού, το οποίο αποκόπηκε από τον υπόλοιπο νέφος. Στη συνέχεια έγινε η επεξεργασία με το Marple με Minimum Support 1000 και Distance Treshold 0.005, και για την περιοχή δημιουργήθηκαν 59 ομάδες σημείων.



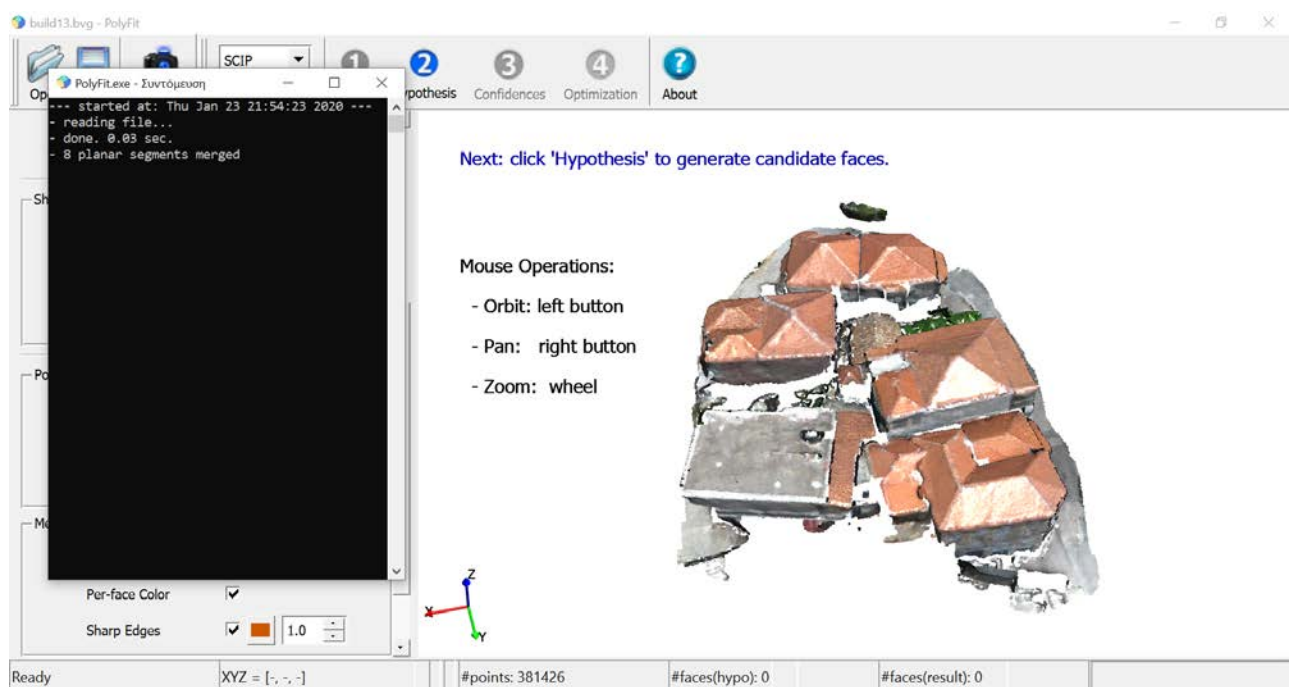
Εικόνα 4.17: Κατάμηση νέφους οικισμού στο mapple (1).

Οι πρώτες τρεις φάσεις της μοντελοποίησης στο Polyfit έγιναν κανονικά, το πρόγραμμα υπολόγισε τα «υποψήφια» επίπεδα των κτιρίων, προχώρησε σε συγχώνευση επιπέδων, αλλά δεν μπορούσε να ανταποκριθεί στο τελευταίο στάδιο της τελικής επιλογής των επιπέδων. Σε αυτό το σημείο το πρόγραμμα αδυνατούσε να ανταπεξέλθει στους υπολογισμούς. Ακόμα και μετά από δεκάδες ώρες επεξεργασίας αδυνατούσε να δώσει κάποιο αποτέλεσμα.

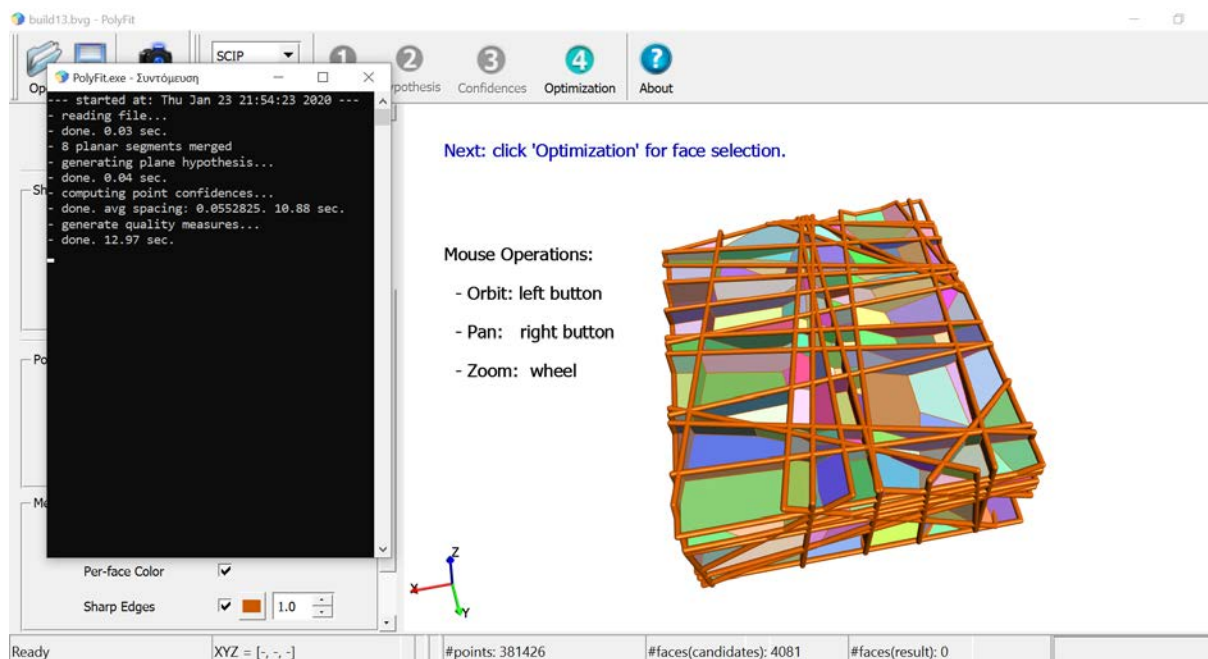


Εικόνα 4.18: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων περιοχής του οικισμού (1).

Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε και στις προσπάθειες που έγιναν με λιγότερα δεδομένα σε περιοχές μικρότερης έκτασης.



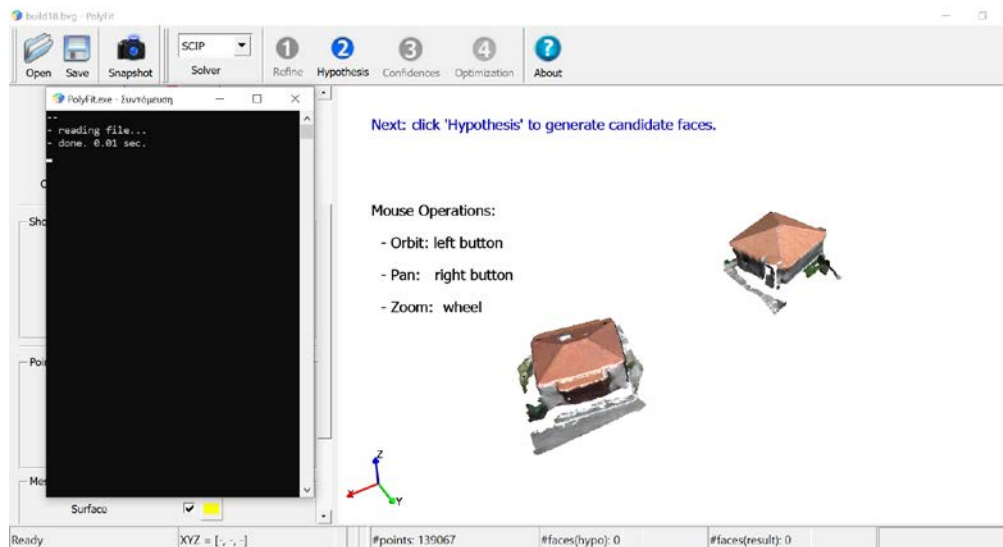
Εικόνα 4.19: Κατάτμηση νέφους οικισμού στο mapple (2).



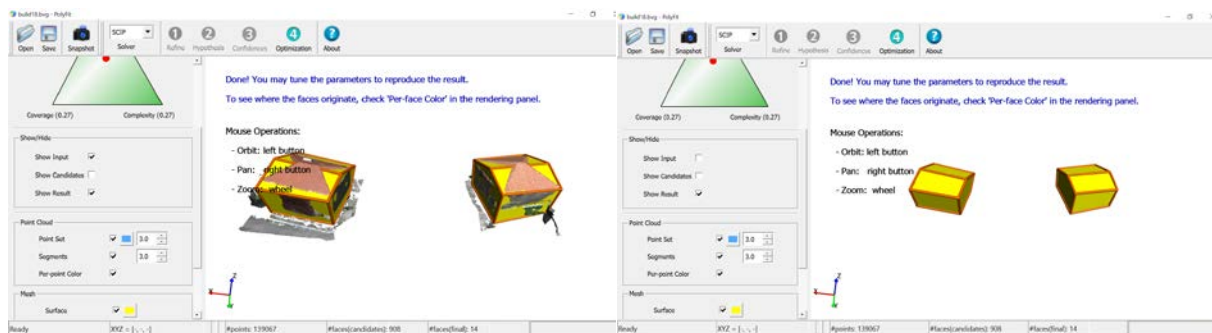
Εικόνα 4.20: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων περιοχής του οικισμού (2).

Αποτέλεσμα τελικά προέκυψε όταν ξεκίνησε η επεξεργασία για περιοχές με 2, 3 και 4 κτίρια. Σε περιοχές με απλά κτίσματα, που μπορεί να περιλαμβάνουν κάτω από 10 συνολικά επιφάνειες, το λογισμικό έδωσε ορθά αποτελέσματα, αν και πολλές φορές ο χρόνος επεξεργασίας ήταν αυξημένος. Για άλλη μια φορά, η επιλογή του Distance Threshold ήταν καθοριστική στην αποτύπωση της λεπτομέρειας των κτιρίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μοντελοποίηση που έγινε σε δύο κτίρια, με Distance Threshold 0.005 m έδωσε 2 επίπεδα στις σκεπές κτιρίων που αποτελούνταν από 4 επίπεδα, ενώ με την επιλογή της ίδιας παραμέτρου στα 0.0005 m, συμπεριλήφθηκαν όλες οι επιφάνειες (Εικ. 4.25).

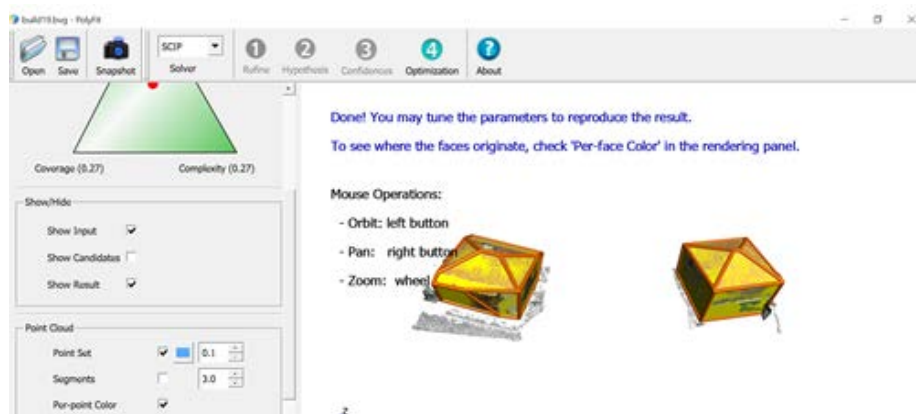
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία τριών και τεσσάρων κτιρίων ταυτόχρονα διαφοροποιούνται από κτίριο σε κτίριο σε κάποιες περιπτώσεις. Παρατηρείται πως υπάρχουν επιφάνειες οι οποίες έχουν σχηματιστεί εσφαλμένα (Εικ. 4.25), και ακόμα άλλες οι οποίες ενώ υπάρχουν στην πραγματικότητα δεν συμπεριλαμβάνονται στο τελικό μοντέλο (Εικ. 4.26).



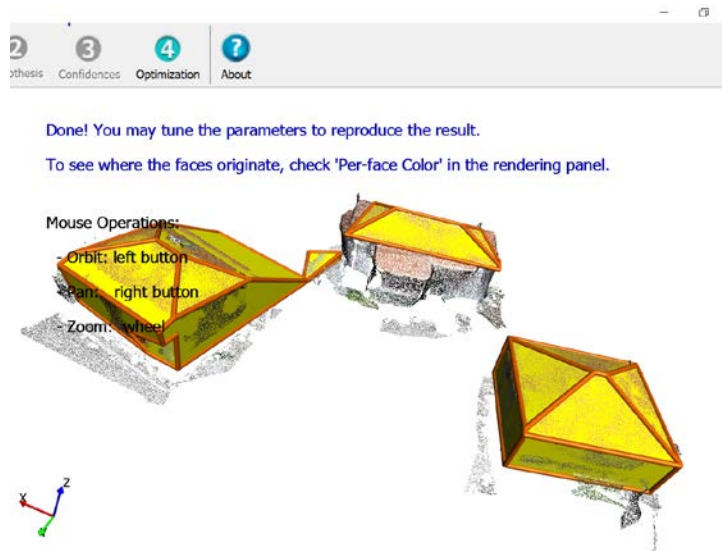
Εικόνα 4.21: : Κατάτμηση 2 κτιρίων του οικισμού στο mapple.



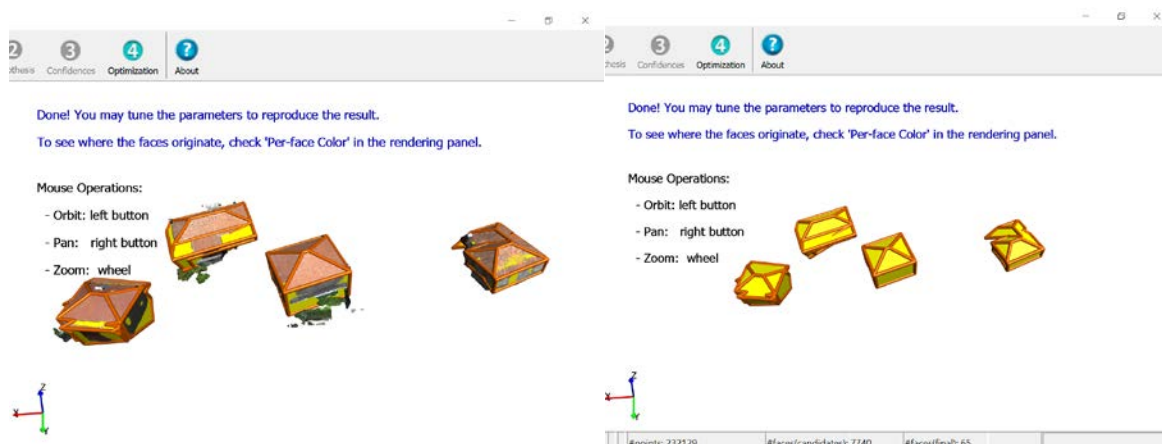
Εικόνα 4.22: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.005\text{ m}$ (2 κτίρια οικισμού).



Εικόνα 4.23: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005\text{ m}$ (2 κτίρια οικισμού).

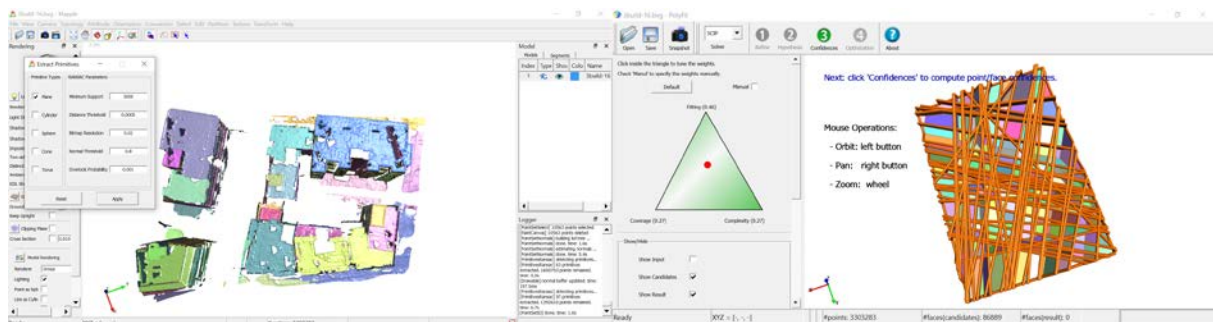


Εικόνα 4.24: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005\text{ m}$ (3 κτίρια οικισμού).

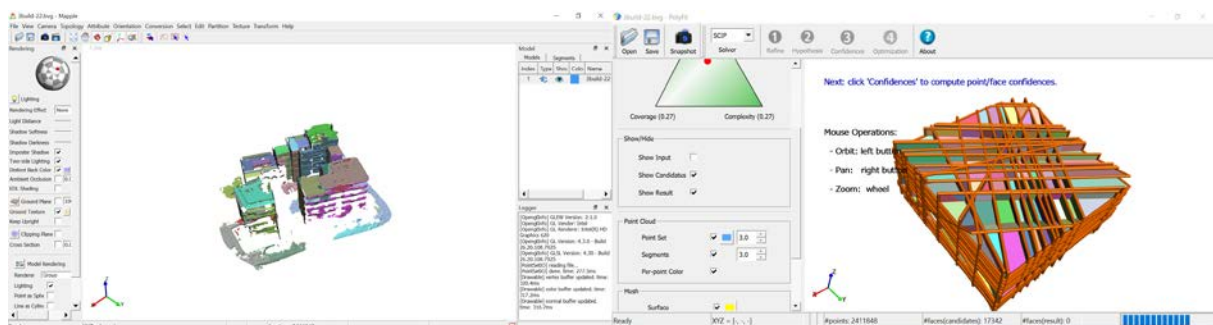


Εικόνα 4.25: Αποτελέσματα μοντελοποίησης με $d=0.0005\text{ m}$ (4 κτίρια οικισμού).

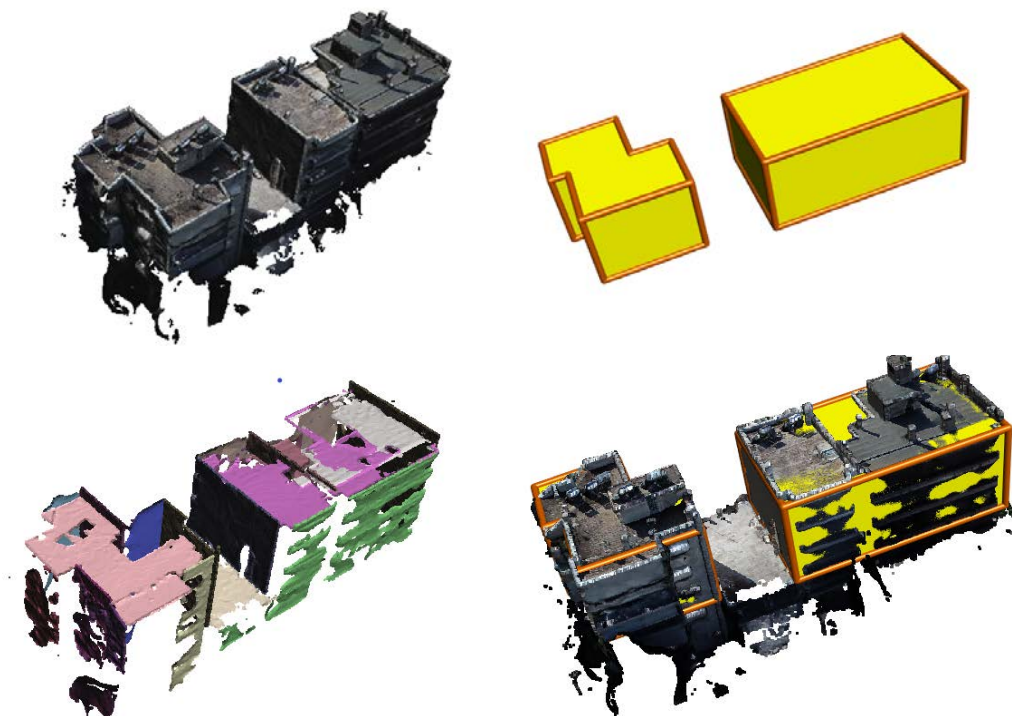
Αντίστοιχες δυσκολίες αντιμετωπίστηκαν και στην προσπάθεια να μοντελοποιηθούν συστάδες κτιρίων στην αστική περιοχή. Αρχικά για κάποια μεγαλύτερα κομμάτια του νέφους δεν έγινε δυνατό να ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση (Εικ. 4.26 και 4.27). Στη συνέχεια, για μικρότερες περιοχές με δύο κτίσματα η κάθε μία και επιλογή Minimum Support 4000, Distance Treshold 0.0005 m, η μοντελοποίηση ολοκληρώθηκε σχετικά γρήγορα και έδωσε σωστά αποτελέσματα (Εικ. 4.28 και 4.29).



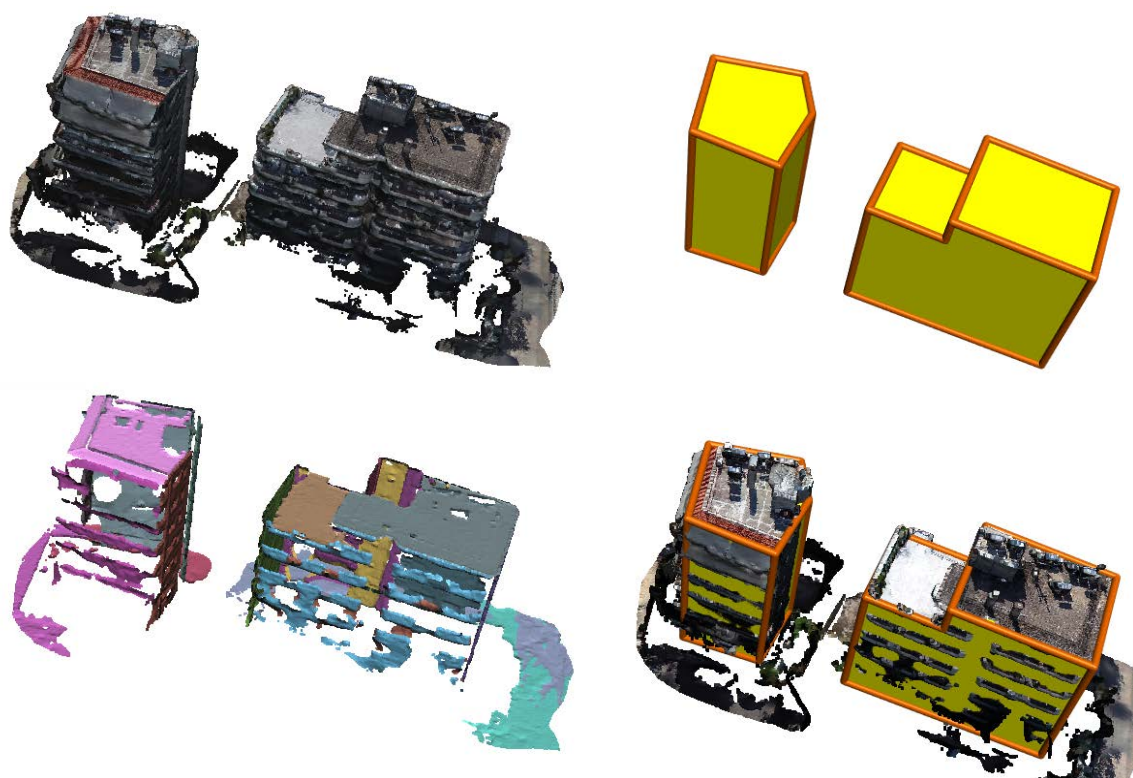
Εικόνα 4.26: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων κτιρίων της αστικής περιοχής (1).



Εικόνα 4.27: Αδυναμία προγράμματος στην επιλογή των τελικών επιπέδων κτιρίων της αστικής περιοχής (2).



Εικόνα 4.28: Αποτελέσματα μοντελοποίησης 2 κτιρίων αστικής περιοχής (1).



Εικόνα 4.29: Αποτελέσματα μοντελοποίησης 2 κτιρίων αστικής περιοχής (2).

4.4. Αξιολόγηση της μοντελοποίησης κτιρίων

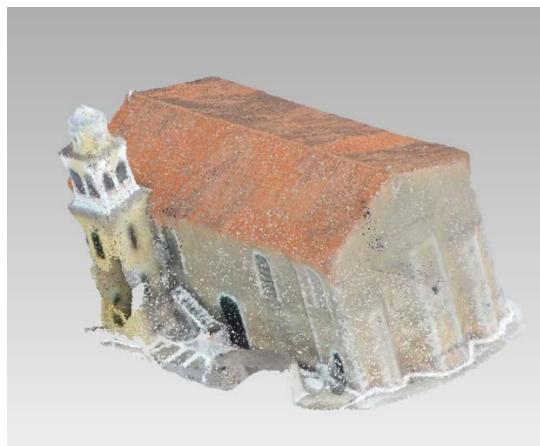
Ο έλεγχος για την επιτυχία της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε σε δύο δείγματα, στα κτίρια που μπορούν να χαρακτηριστούν τα πιο περίπλοκα στο κάθε ένα από τα δύο νέφη σημείων που εξετάζονται.

Στην περίπτωση του οικισμού επιλέχτηκε η εκκλησία, ενώ στην περίπτωση του αστικού ιστού το σύμπλεγμα κτιρίων που περιλαμβάνει εναλλαγές στις διαστάσεις, έντονη μορφολογία και αρκετή λεπτομέρεια. Για να γίνει η αξιολόγηση της μοντελοποίησης των κτισμάτων, έτσι όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στο PolyFit, χρειάζεται να γίνει σύγκριση κάποιων μετρήσιμων στοιχείων σε σχέση με ένα μοντέλο το οποίο ανταποκρίνεται πιστά στην πραγματικότητα.

Τα μεγέθη τα οποία εξετάστηκαν είναι το μέγιστο μήκος, πλάτος και ύψος των κτιρίων, αλλά και η συνολική επιφάνεια που καλύπτουν. Για να διαπιστωθεί η ακρίβεια της μοντελοποίησης επιλέχτηκε το πιο πολύπλοκο κτίριο από κάθε σετ δεδομένων.

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε στο Agisoft, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μετρήσει πραγματικές διαστάσεις σε ένα μοντέλο, καθώς και το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών από τις οποίες αποτελείται. Τα μοντέλα που προέκυψαν από την επεξεργασία στο polyfit έγιναν εισαγωγή στο Agisoft και πραγματοποιήθηκαν οι ανάλογες μετρήσεις.

Για τη δημιουργία ενός πρότυπου μοντέλου με το οποίο έγινε η σύγκριση, έγινε χειροκίνητη αποκοπή των κτιρίων από το νέφος, απαλείφτηκε ο θόρυβος και στη συνέχεια έγινε επεξεργασία σε κάθε κτίριο στο περιβάλλον του λογισμικού Geomagic (Εικ. 4.30 και 4.31), όπου δημιουργήθηκε το πρότυπο μοντέλο του κτιρίου με τη διαδικασία “wrap” με την οποία γίνεται μετατροπή των σημείων του νέφους σε ένα πολυγωνικό αντικείμενο με τρίγωνα (mesh). Σε αυτή τη διαδικασία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον μέγιστο αριθμό τριγώνων του μοντέλου (προεπιλογή – 250000), την ακρίβεια της μετατροπής, την αυτόματη απαλοιφή του θορύβου. Ωστόσο, μετά την μετατροπή το μοντέλο βελτιστοποιήθηκε και με άλλα εργαλεία που διαθέτει το λογισμικό. Καλύφθηκαν κενά και ομαλοποιήθηκε το πλέγμα σε κάποια σημεία όπου εμφανίζονταν παραμορφώσεις.



Εικόνα 4.30: Δημιουργία πρότυπων μοντέλων στο Geomagic - Εκκλησία.

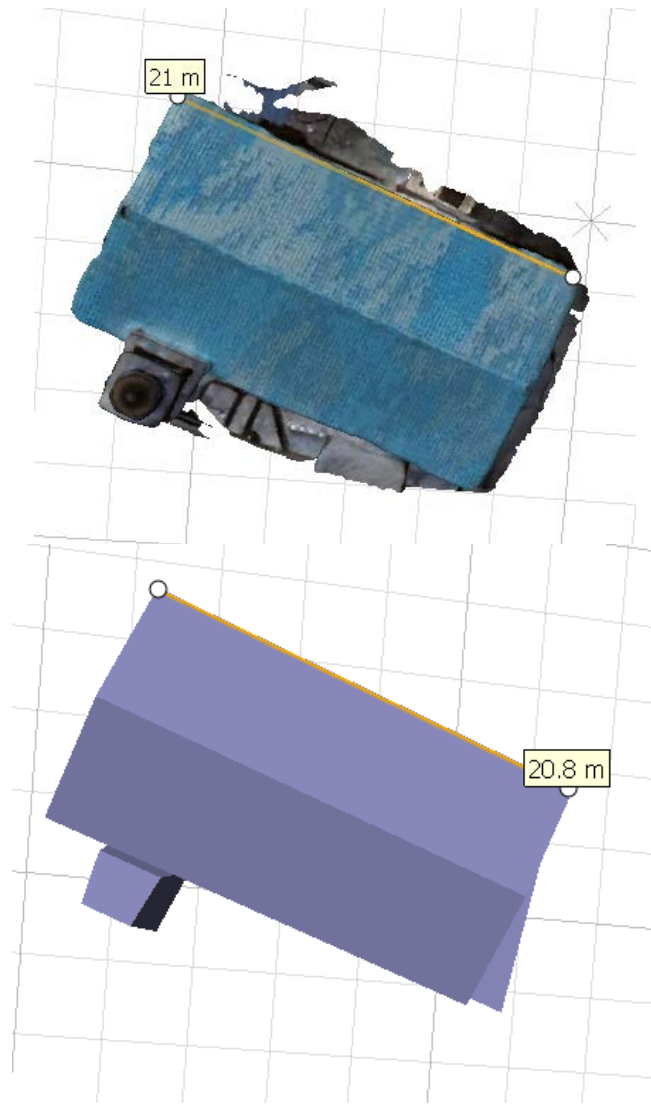


Εικόνα 4.31: Δημιουργία πρότυπων μοντέλων στο Geomagic - Πολυκατοικία.

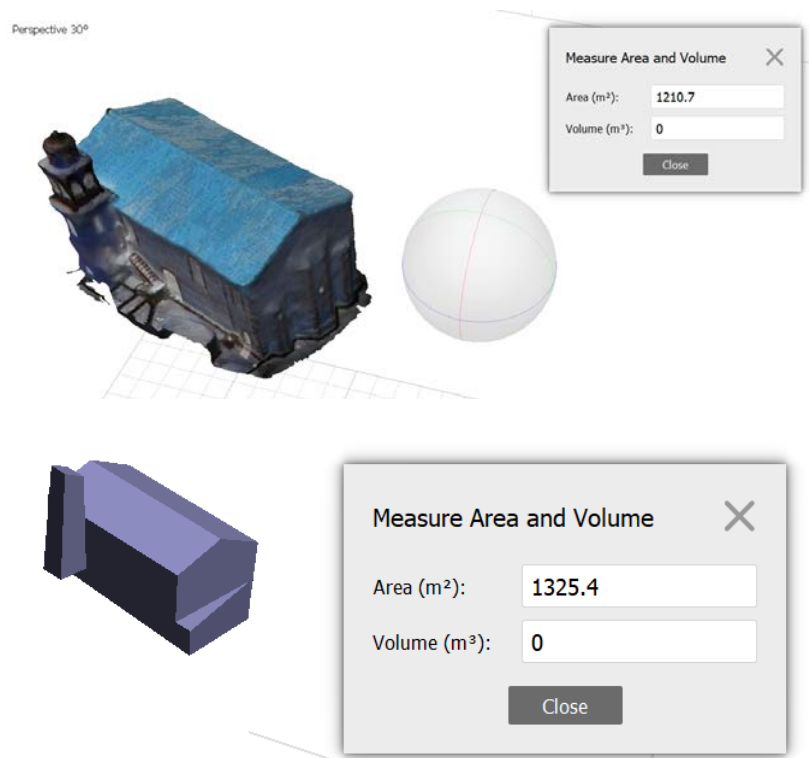
Από τη σύγκριση των μοντέλων που πραγματοποιήθηκε για την εκκλησία, οι διαφορές που προέκυψαν για το πλάτος, το μήκος και ύψος των μοντέλων δεν ξεπερνούσαν τα 0.02 m (Εικόνες 4.32). Το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας της εκκλησίας που μοντελοποιήθηκε στο PolyFit ($1.325,4 \text{ m}^2$) ήταν κατά 115 m^2 μεγαλύτερο από το πρότυπο μοντέλο (Εικ. 4.33).

Αντίστοιχα, από τη σύγκριση των μοντέλων για το σύμπλεγμα κτιρίων στον αστικό ιστό, οι διαφορές που προέκυψαν για το πλάτος, το μήκος και το ύψος των μοντέλων δεν ξεπερνούσαν τα 0.03 m (Εικόνα 4.34). Το εμβαδό της συνολικής επιφάνειας του κτιρίου που μοντελοποιήθηκε στο PolyFit (3.805 m^2) ήταν κατά 239 m^2 μεγαλύτερο από το πρότυπο μοντέλο (Εικ. 4.35).

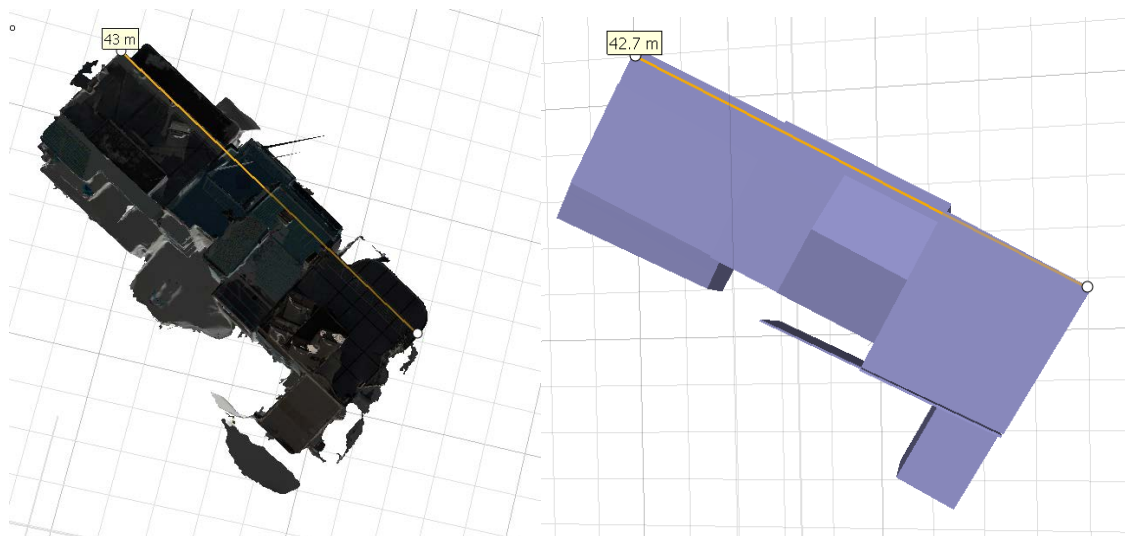
Παρατηρείται πως οι διαφορές στις διαστάσεις έχουν μεγάλη ακρίβεια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ στις εμβαδομετρήσεις υπάρχουν αποκλίσεις, δηλαδή προκύπτει ότι έχουν μοντελοποιηθεί εσφαλμένα και επιφάνειες οι οποίες στην πραγματικότητα μπορεί να μην υπάρχουν. Αυτές οι επιφάνειες αντιστοιχούν στο 6.3% της συνολικής επιφάνειας για το σύμπλεγμα κτιρίων και στο 8.7% της συνολικής επιφάνειας για την εκκλησία.



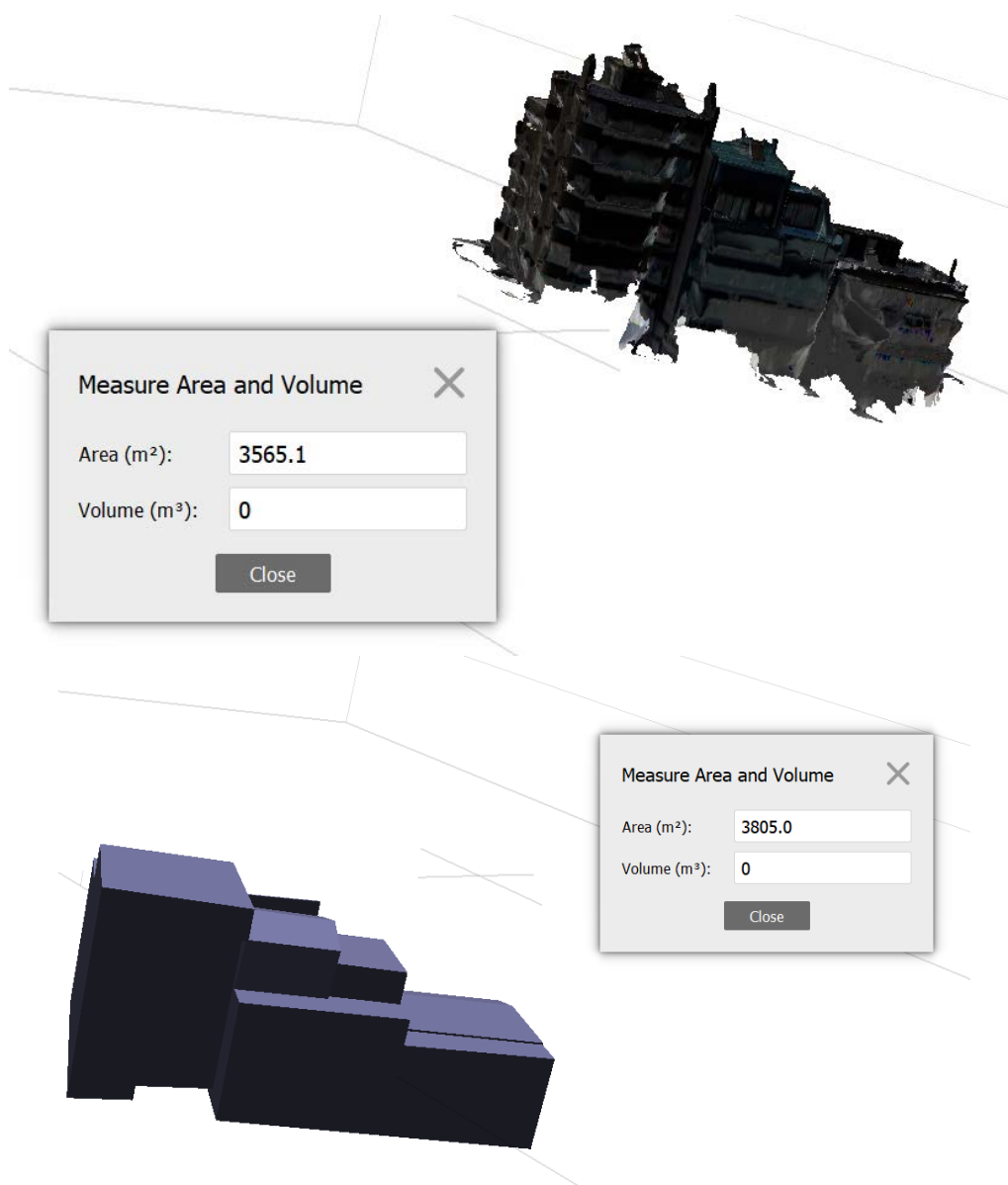
Εικόνα 4.32: Διαστασιολόγηση μοντέλων εκκλησίας. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.



Εικόνα 4.33: Εμβαδομέτρηση μοντέλων εκκλησίας. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.



Εικόνα 4.34: Διαστασιολόγηση μοντέλων κτιρίου στον αστικό ιστό. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.



Εικόνα 4.35: Εμβαδομέτρηση μοντέλων κτιρίου στον αστικό ιστό. Πάνω απεικονίζεται το πρότυπο μοντέλο.

Μοντέλο	Εκκλησία PolyFit	Εκκλησία Geomagic	Σύμπλεγμα Κτιρίων PolyFit	Σύμπλεγμα Κτιρίων Geomagic
Μήκος (μ)	20.8	21	42.7	43
Πλάτος (μ)	11.4	11.6	19.4	19.5
Ύψος (μ)	11.5	11.4	18.8	18.6
Επιφάνεια (τμ)	1325.4	1210.7	3805	3565.1

Εικόνα 4.36: Πίνακας Διαστασιολόγησης και εμβαδομέτρησης μοντέλων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία προκύπτει πως μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματη εξαγωγή κτιρίων από νέφη σημείων με κατ' αρχήν ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στην ταξινόμηση όσο και στην μοντελοποίησή τους.

Οι τεχνικές εκμάθησης μηχανής αποτελούν τις πιο σύγχρονες, αξιόπιστες και γρήγορες τεχνικές για τον εντοπισμό κτιρίων στα νέφη. Υπάρχουν αρκετά λογισμικά πλέον τα οποία υποστηρίζουν λειτουργίες αυτόματης ταξινόμησης με τέτοιες μεθόδους, και τα περισσότερα βασίζονται σε μεγάλο όγκο δεδομένων που είναι διαχειρίσιμος από τα μεγαλύτερα και πιο σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα.

Για το λόγο αυτό, τα πιο αξιόπιστα λογισμικά αυτής της κατηγορίας δεν είναι ανοιχτά. Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, όπως το Arcgis 10.5 αρχικά και το Agisoft Metashape Proffesional στη συνέχεια, είναι εμπορικά λογισμικά, και το αρνητικό σε σχέση με τα ανοιχτά λογισμικά είναι ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα να γίνει ανάλυση των τεχνικών εκμάθησης μηχανής που αξιοποιούνται.

Έγινε όμως αναλυτική αξιολόγηση της ταξινόμησης, η οποία στην περίπτωση του Agisoft Metashape ήταν επιτυχημένη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο στον οικισμό όσο και στην αστική περιοχή δεν απέκλιναν σε μεγάλο βαθμό από τα groundtruth που δημιουργήθηκαν. Ειδικά στην αστική περιοχή όπου τα κτίρια ήταν ψηλότερα και το νέφος σημείων πυκνότερο, τα αποτελέσματα στον εντοπισμό κτιρίων ήταν αρκετά εντυπωσιακά.

Αντίθετα, η τρισδιάστατη μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σε ανοιχτά λογισμικά, γεγονός που επέτρεψε την αναλυτική επεξήγηση της μεθοδολογίας, ενώ βοήθησε να γίνει συνολικά αντιληπτή η λειτουργία των λογισμικών Mapple και Polyfit. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μοντελοποίηση μεμονωμένων πολύπλοκων κτιρίων είναι ενθαρρυντικά.

Το μοντέλο που δημιουργείται στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμόζει με ικανοποιητική ακρίβεια στο κτίριο, όπως φάνηκε στην περίπτωση της εκκλησίας για

τον οικισμό και της πολυκατοικίας για την αστική περιοχή. Καθοριστικοί παράγοντες για την σωστή μοντελοποίηση των κτιρίων αποδείχτηκαν οι εξής:

- Ο “θόρυβος” στα δεδομένα – και κυρίως η βλάστηση – επηρεάζει σημαντικά τις επιφάνειες που δημιουργούνται. Τα κτίρια που δεν περιστοιχίζονταν από δέντρα μοντελοποιήθηκαν πιο εύκολα και σωστά.
- Πρέπει να υπάρχει πληροφορία σημείων σε ολόκληρο το κτίριο για να μοντελοποιηθεί αυτό σωστά. Τα κενά, οι «τρύπες» σε πολλά κτίρια, εμποδίζουν συχνά τη δημιουργία βασικών επιφανειών που απαρτίζουν το κτίριο, με αποτέλεσμα η μοντελοποίηση να γίνεται με λάθος τρόπο.
- Σημαντική είναι ειδικά η έλλειψη πληροφορίας στη βάση των κτιρίων. Όταν αξιοποιήθηκαν ground points από την ταξινόμηση, μοντελοποιήθηκαν και επιφάνειες των κτιρίων που δεν συμπεριλαμβάνονταν προηγουμένως.
- Η ταξινόμηση είναι σημαντική για την μοντελοποίηση. Αν έχουν κρατηθεί περαιτέρω ή λιγότερα σημεία από αυτά που αντιστοιχούν στο κτίριο, μπορεί να δημιουργηθούν επιφάνειες που δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα.
- Η σωστή επιλογή των παραμέτρων του Ransac και ειδικά του Minimum Support και του Distance Threshold είναι καθοριστική. Κάθε περίπτωση κτιρίου είναι ξεχωριστή, με διαφορετικό θόρυβο, διαφορετική πυκνότητα και έλλειψη πληροφορίας. Δεν ανταποκρίνεται ο αλγόριθμος το ίδιο σε κάθε περίπτωση. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που υπήρχε δυσκολία στην ταυτόχρονη μοντελοποίηση πολλών κτισμάτων μαζί.
- Από την επεξεργασία περισσότερων κτιρίων μαζί, επιβεβαιώνεται και το γεγονός ότι μια περιορισμένη υπολογιστική ισχύς του υπολογιστή δυσχεραίνει την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων. Για το λόγο αυτό κάθε φορά γινόταν προσπάθεια να βρεθεί μια λεπτή ισορροπία μεταξύ της σωστής απεικόνισης των λεπτομερειών του μοντέλου και της απρόσκοπτης λειτουργίας της εφαρμογής.

Για την συνέχεια αξίζει να σημειωθεί πως θα ήταν χρήσιμο να γίνει μία αντίστοιχη έρευνα σε συνέχεια της παρούσας μελέτης η οποία θα εξετάζει τα εξής τρία ζητήματα:

- Αν υπάρχουν αντίστοιχα ελεύθερα λογισμικά για τον αυτόματο εντοπισμό κτιρίων με μεθόδους εκμάθησης μηχανής και πως αυτά ανταποκρίνονται σε σχέση με τα εμπορικά.
- Αν σε κάποια υπολογιστική μονάδα μεγαλύτερης ισχύος θα μπορούσε να γίνει ταυτόχρονη μοντελοποίηση πολλών κτιρίων με την ίδια αξιοπιστία στα αποτελέσματα.
- Αν τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να είναι διαχειρίσιμα σε ένα τρισδιάστατο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, με σκοπό την αξιοποίηση των κτιριακών υποδομών σε εφαρμογές όπως Διαχείριση Φυσικών Καταστροφών, το Κτηματολόγιο κ.λπ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alber, B., Kada, M. and Wichmann, A., 2016. Automatic extraction and regularization of building outlines from airborne lidar point clouds. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B3.

Awrangjeba, M., Zhangb, C. and Fraserb, C., 2013. Automatic Extraction of Building Roofs Using LIDAR Data and Multispectral Imagery. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, September 2013.

Barrile, V., Candela, G. and Fotia, A., 2019. Point cloud segmentation using image processing techniques for structural analysis. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W11, Milan, Italy.

Becker, C., Häni, N., Rosinskaya, E., d'Angelo, E. and Strecha, C., 2017. Classification of Aerial Photogrammetric 3D Point Clouds. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4, 3-10.

Bool, D.L., Mabaquiao, L.C., Tupas, M.E. and Fabila, J.L., 2018. Automated building detection using ransac from classified lidar point cloud data. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W9.

Dohan, D., Matejek, B. and Funkhouser, T., 2015. Learning hierarchical semantic segmentations of LIDAR data. In: Proc. IEEE International Conference on 3D Vision, pp. 273-281.

Edelsbrunner, H. and Mücke, E.P., 1992. Three-dimensional alpha shapes. Manuscript UIUCDCS-R-92-1734, Dept. Comput. Sci., Univ. Illinois, Urbana-Champaign, IL.

Goodfellow, I., Bengio, Y. and Courville, A., 2016. Deep learning. In: MIT press.

Hammoudi, K., Dornaika, F. and Paparoditis, N., 2009. Extracting building footprints from 3d point clouds using Terrestrial laser scanning at street level. In: ISPRS Workshop on City Models, Roads and Traffic (CMRT), Paris.

Hackel, T., Wegner, J.D. and Schindler, K., 2016. Contour Detection in Unstructured 3D Point Clouds. Proc. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 1610-1618.

Hackel, T., Wegner, J.D. and Schindler, K., 2016. Fast Semantic Segmentation of 3D Point Clouds with Strongly Varying Density. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-3, 177-184.

Hong Z. et al, 2006. GIS Algorithm Elements. In: Science Press, Beijing, pp.41-43.

Hongjian, Y. and Shuka. L., 2001. Extracting Man-made Building from Sparse Laser Sample Point. In: Journal of the Graduate school of the Chinese Academy of Science, Vol. 18(2), pp. 154-158.

Landrieu, L. and Simonovsky, M., 2018. Large-Scale Point Cloud Semantic Segmentation with Superpoint Graphs. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018, pp. 4558-4567.

LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G., 2015. Deep learning. In: Nature, 521, pp. 436-444.

Maltezos, E. and Ioannidis, C., 2016. Automatic extraction of building roof planes from airborne lidar data applying an extended 3d randomized Hough transform. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-3, 209–216, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-209-2016>.

Mitchell, T., 1997. Machine Learning. In: McGraw Hill.

Nan, L. and Wonka, P., 2017. PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds. In: Visual Computing Center, KAUST.

Özdemir, E. and Remondino, F., 2018. Segmentation of 3d photogrammetric point cloud for 3d building modeling. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W10, The Netherlands.

Özdemir, E. and Remondino, F., 2019a. Classification of aerial point clouds with deep learning. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, The Netherlands.

Özdemir, E. and Remondino, F., 2019b. Aerial point cloud classification with deep learning and machine learning algorithms. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W18, The Netherlands.

Qi, C.R., Yi, L., Su, H. and Guibas, L.J., 2017. Pointnet++: Deep Hierarchical Feature Learning On Point Sets In A Metric Space. In: Advances in Neural Information Processing Systems, pp. 5099 - 5108.

Ruijin, M., 2004. Building Model Reconstruction from LIDAR Data and Aerial Photographs. In: Dissertation, The Ohio State University, USA.

Sampath, A., and Shan, J., 2010. Segmentation And Reconstruction Of Polyhedral Building Roofs From Aerial LiDAR Point Clouds. In: Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 3-2, pp. 1554–1567.

Shuka, L. and Yongqi, X., 2000. Efficiently 3D Remote Sensing Integration System. In: Science Press, Beijing, pp.171-176.

Tarsha-Kurdi, F., Landes, T. and Grussenmeyer, P., 2008. Extended ransac algorithm for automatic detection of building roof planes from lidar data. In: The photogrammetric journal of Finland, 21 (1), pp.97-109.

Thomas, H., Goulette, F., Deschaud, J.E. and Marcotegui, B., 2018. Semantic Classification of 3D Point Clouds with Multiscale Spherical Neighborhoods Proc. In: IEEE International Conference on 3D Vision (3DV), pp. 390-398.

Wang, J. and Shan, J., 2009. Segmentation of lidar point clouds for building extraction. In: Geomatics Engineering, School of Civil Engineering, Purdue University West Lafayette, USA.

Weinmann, M., Jutzi, B. and Mallet, C., 2013. Feature relevance assessment for the semantic interpretation of 3D point cloud data. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 5, 1-7.

Weinmann, M., Jutzi, B. Hinz, S. and Mallet, C., 2015b. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105, 286-304.

Wei, S., 2009. Building boundary extraction based on Lidar point clouds data. In: Ocean College of Shanghai Fisheries University, Shanghai.

Wu, Z., Song, S., Khosla, A., Yu, F., Zhang, L., Tang, X. and Xiao, J., 2015. 3D Shapenets: A Deep Representation for Volumetric Shapes. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1912-1920.

Xinlian, L., 2005. Airborne LIDAR Data Filtering and Building Model Reconstruction. In: Dissertation, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing, China.

Yousefhussien, M., Kelbe, D.J. , Ientilucci, E.J. and Salvaggio, C., 2018. A multi-scale fully convolutional network for semantic labeling of 3D point clouds. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 143, 191-204.

Zhou, Q., Park, J. and Koltun, V., 2018. Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. In: Intel Labs.

Δήμητρα, Π., 2015. Τρισδιάστατη μοντελοποίηση κτιρίων με χρήση του citygml πρότυπου. ΕΜΠ, ΣΑΤΜ, Τομέας Τοπογραφίας.

Νάσκος, Α., 2019. Αναγνώριση Γεωμετρικών Προτύπων Σε Νέφη Σημείων. ΑΠΘ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωματικής.