



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ
ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ (UAS)**

Εφαρμογή στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου



Αζναβουρίδης Κωνσταντίνος

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΓΕΩΔΑΙΣΙΑΣ

**ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ
ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ (UAS)**

Εφαρμογή στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου

Διπλωματική Εργασία

του

Αζναβουρίδη Κωνσταντίνου

Επιβλέπουσα:

Ευαγγελία Λάμπρου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

(Υπογραφή)

.....
Ευαγγελία Λάμπρου
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ανδρέας Γεωργόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Ευθύμιος Μπακογιάννης
Μέλος Ε.ΔΙ.Π.

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

(Υπογραφή)

.....

ΑΖΝΑΒΟΥΡΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αζναβουρίδης Κωνσταντίνος, 2018

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά το τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς ευχαριστίες μου στους καθηγητές της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ κα. **Ευαγγελία Λάμπρου** και κ. **Γιώργο Πανταζή** για τη διατύπωση και την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος, απαιτητικού, πολύπλευρου και ταυτόχρονα σύγχρονου θέματος.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να τους ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν να πειραματιστώ με νέες τεχνολογίες, την ελευθερία να λάβω αποφάσεις και την καθοδήγησή τους. Επιπλέον, οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του ΕΜΠ κ. **Ανδρέα Γεωργόπουλο** ο οποίος πολύ πρόθυμα και με μεγάλη ευχαρίστηση έλυσε οποιαδήποτε απορία μου δημιουργήθηκε.

Ευχαριστώ πολύ τον κ. **Ασημάκη Χαδουμέλλη**, Διευθυντή του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαύριου, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς μας υποδέχτηκε εγκάρδια στον χώρο και ήταν πάντα πρόθυμος και συνεργάσιμος για οτιδήποτε χρειαστήκαμε εγώ και η συνεργάτης μου τις ημέρες των εργασιών υπαίθρου.

Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ **Νίκο Κανελλόπουλο**, που βρισκόταν μαζί μας στο ύπαιθρο και μας έλυνε συνεχώς απορίες σχετικά με το θεωρητικό υπόβαθρο αλλά και την πρακτική εφαρμογή, αλλά και τον Διπλωματούχο Τοπογράφο Μηχανικό του ΕΜΠ, **Βασίλη Ζαφείρη** που παρείχε το UAV, πραγματοποίησε την πτήση και λήψη των δεδομένων και μας εξήγησε τις βασικές αρχές για την επεξεργασία αυτών.

Ωστόσο, το μεγαλύτερο μου ευχαριστώ και εκτίμηση θέλω να εκφράσω στη φίλη και συνεργάτη μου **Στεφανία Ιωαννίδου** με την οποία πραγματοποιήσαμε μαζί τις μετρήσεις πεδίου, την επεξεργασία των γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών δεδομένων και είμασταν πάντα ο ένας δίπλα στον άλλο σε ότι πρόβλημα προέκυψε.

Τέλος μέσα από την καρδιά μου ευχαριστώ του γονείς μου **Παύλο** και **Ελευθερία** που χωρίς τις ανιδιοτελείς θυσίες τους και την αμέριστη υποστήριξή τους δεν θα ήμουν σε θέση να ολοκληρώσω τις σπουδές μου σε αυτό το επίπεδο και να εκπληρώσω τους στόχους μου. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το στενό μου φιλικό και συναδελφικό περιβάλλον για τη συμπαράσταση και την κατανόηση στη προσπάθειά μου, στα άγχη και τις αγωνίες μου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Αζναβουρίδης Κωνσταντίνος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται από την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας και τη συνεχή προσπάθεια των ανθρώπων να παράγουν περισσότερα σε λιγότερο χρόνο και με λιγότερους πόρους. Στο πλαίσιο αυτό η παρεμβατικότητα της ανθρώπινης δραστηριότητας αποκλιμακώνεται και ο κλάδος των μηχανικών στρέφεται σε σύγχρονα μέσα για την κατασκευή και συντήρηση τεχνικών έργων και υποδομών και την παρακολούθηση όλων των φάσεων ενός έργου.

Στις ανάγκες και προκλήσεις αυτές, ο Αγρονόμος και Τοπογράφος μηχανικός, έχοντας κατανόηση της γεωχωρικής πληροφορίας, είναι ο μοναδικός που μπορεί να δώσει τεκμηριωμένες λύσεις. Ταυτόχρονα είναι ο μοναδικός που μπορεί λόγω του επιστημονικού του υποβάθρου να ελέγξει την ορθότητα και ακρίβεια των λύσεων που προτείνει και εκμεταλλευόμενος τις σφαιρικές γνώσεις και κατάρτιση του να παράγει προϊόντα και σε τρεις διαστάσεις.

Το γεγονός αυτό λοιπόν, οδήγησε στην ιδέα δημιουργίας ενός τριδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιώντας συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών γνωστά και ως UAV. Η αξιοποίηση και εκμετάλλευση των UAV έχει ξεκινήσει αρκετά χρόνια τώρα από ιδιώτες και μηχανικούς σε εμπορικό επίπεδο, κυρίως όμως στη παραγωγή και σύνταξη ορθοφωτοχαρτών. Στην εκμετάλλευση αυτή έχουν βοηθήσει φυσικά και οι εξελίξεις στο τομέα του computer vision που καθιστούν εύκολη και αποτελεσματική την επεξεργασία δεδομένων και την εξαγωγή πληροφορίας.

Η παραγωγή τριδιάστατου μοντέλου ενός φυσικού αντικειμένου και ο έλεγχος αυτού αποτελεί φυσικά μια πρόκληση. Γι' αυτό το λόγο θα γίνει και σύγκριση αυτού από κάθε διαθέσιμη σκοπιά με ένα τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα της ίδιας περιοχής, γεγονός που αποτέλεσε και το έναυσμα για τη παρούσα διπλωματική εργασία.

Η εφαρμογή της μεθόδου θα γίνει στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου, σε ένα κτιριακό συγκρότημα. Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν θα αφορούν τους χρόνους εργασιών, το τελικό οπτικό αποτέλεσμα, την σύγκριση και τον έλεγχο του με το τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα και τέλος την χρησιμότητα αυτής της μεθόδου στο σύνολο της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	III
ΕΙΚΟΝΕΣ	V
ΠΙΝΑΚΕΣ	VI
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	VII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VIII
ABSTRACT	IX
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΟ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

1.1 Γενικά	2
1.2 Τα στάδια δημιουργίας του 3D μοντέλου	5
1.3 Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών-UAS	8
1.4 Προγραμματισμός πτήσης.....	10
1.5 Γεωαναφορά μοντέλου	15
1.6 Λογισμικά επεξεργασίας	17
1.7 Παραγωγή τριδιάστατου μοντέλου	21
1.8 Έλεγχος.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1 Περιοχή μελέτης	27
2.2 Εξοπλισμός	29
2.3 Σήμανση και μέτρηση φωτοσταθερών	31
2.4 Προγραμματισμός και διαδικασία πτήσης.....	36
2.5 Νομικό πλαίσιο.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Γενικά	42
------------------	----

3.2 Εισαγωγή δεδομένων.....	43
3.3 Συνταύτιση σημείων – Alignment.....	47
3.4 Γεωαναφορά και βελτιστοποίηση μοντέλου	49
3.5 Παραγωγή μοντέλου.....	59
3.6 Παραγωγή ορθοφωτοχάρτη.....	70
3.7 Έλεγχος.....	74
3.8 Προβλήματα	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Συμπεράσματα.....	89
4.2 Προτάσεις	92

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

94

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

96

EΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Πρόβλημα SfM	2
Εικόνα 1.2: Εμπροσθοτομία (αριστερά) και οπισθοτομία (δεξιά)	3
Εικόνα 1.3: Η συνθήκη συγγραμμικότητας.....	4
Εικόνα 1.4: Ορισμός επιπολικού επιπέδου και επιπολικής ευθείας.....	6
Εικόνα 1.5: UAV Πλατφόρμες σταθερών φτερών (δεξιά: Hubsan Spy Hawk H301S, αριστερά: senseFly eBee)	9
Εικόνα 1.6: UAV Πλατφόρμες πολλαπλών στροφείων (δεξιά πάνω: DJI Phantom 3 Standard, αριστερά πάνω: DJI Mavic Pro, δεξιά κάτω: Yuneec Typhoon H Pro, αριστερά κάτω: DJI Spreading Wings S900).....	10
Εικόνα 1.7: Λογισμικό Pix4D Capture.....	13
Εικόνα 1.8: Φρεάτιο φωτιζόμενο υπό γωνία	14
Εικόνα 1.9: Αυτοκόλλητος στόχος για σήμανση φωτοσταθερών κτιρίου.....	16
Εικόνα 1.10: Φωτογραφικό-εικονιστικό σκαρίφημα	17
Εικόνα 1.11:Περιβάλλον εργασίας Agisoft PhotoScan Pro	18
Εικόνα 1.12: Τριδιάστατο μοντέλο δέντρου (δεξιά) μετά από επεξεργασία.....	19
Εικόνα 1.13: Ορθοφωτοχάρτης παραγμένος στο PhotoScan.....	19
Εικόνα 1.14: Κωδικοποιημένος στόχος Photoscan	20
Εικόνα 1.15: Sparse cloud, Mesh, 3D model	22
Εικόνα 1.16: Εφαρμογή Sketchfab για θέαση 3D μοντέλων	23
Εικόνα 1.17: Τριδιάστατος εκτυπωτής.....	24
Εικόνα 1.18: Εκτυπωμένο τριδιάστατο μοντέλο κτιρίου	24
Εικόνα 2.1: Τοποθεσία ΤΠΠΛ	27
Εικόνα 2.2: Κάτοψη του ΤΠΠΛ.....	28
Εικόνα 2.3: DJI Phantom 4 Pro	30
Εικόνα 2.4: Ξύλινη ιδιοκατασκευή για σήμανση φωτοσταθερών	32
Εικόνα 2.5: Σχήμα (αριστερά) και φωτοσταθερό πάνω στο έδαφος (δεξιά).....	33
Εικόνα 2.6: Κατανομή Φωτοσταθερών στην περιοχή μελέτης.....	33
Εικόνα 2.7: Κατάλληλες θέσεις για χρήση ως τοποσταθερά	35
Εικόνα 2.8: Αντίστοιχες θέσεις της εικόνας 2.7 στο ψηφιακό διάγραμμα	35
Εικόνα 2.9: Λογισμικό πτήσης Pix4D Capture	36
Εικόνα 3.1: Εισαγωγή φωτογραφιών και δημιουργία chunk	43
Εικόνα 3.2: Θέσεις των καμερών στο χώρο	44
Εικόνα 3.3: Συντελεστής ποιότητας των λήψεων μετά τον έλεγχο ...	44

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Phantom 4 Pro	30
Πίνακας 2.2: Συντεταγμένες φωτοσταθερών στο ΕΓΣΑ'87.....	32
Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες φωτοσταθερών στο ΕΓΣΑ'87.....	46
Πίνακας 3.2: Πίνακας μεταβλητότητας-συμεταβλητότητας.....	64
Πίνακας 3.3: Σφάλματα γεωδαιτικής αποτύπωσης	76
Πίνακας 3.4: Σφάλματα φωτογραμμετρικής επεξεργασίας σημείων ελέγχου	77
Πίνακας 3.5: Έλεγχος αποκλίσεων των σημείων	79
Πίνακας 3.6: Στοιχεία αποκλίσεων 3D μοντέλου	82
Πίνακας 3.7: Στοιχεία διαφορών φωτογραμμετρικών δεδομένων.....	83
Πίνακας 3.8: Αποκλίσεις γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών συντεταγμένων	84

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 3.1: Σχέση αριθμού τοποσταθερών με τα συνολικά σφάλματα.....	54
Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα διαφορών συντεταγμένων 3D μοντέλου	80
Διάγραμμα 3.3: Κατανομή διαφορών δ_X	81
Διάγραμμα 3.4: Κατανομή διαφορών δ_Y	81
Διάγραμμα 3.5: Κατανομή διαφορών δ_H	81
Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα διαφορών συντεταγμένων φωτογραφιών	85

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός τριδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιώντας συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών γνωστά και ως UAV. Το μοντέλο αυτό θα είναι γεωαναφερμένο στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ'87) και θα γίνει σύγκριση αυτού με αντίστοιχο τριδιάστατο μοντέλο παραγμένο με γεωδαιτικές και επίγειες μεθόδους.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια τα οποία διαρθρώνονται ως εξής:

- Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή του προβλήματος Structure from Motion (SfM) με το οποίο ανακατασκευάζεται το τριδιάστατο μοντέλο. Παράλληλα περιγράφονται τα στάδια που είναι απαραίτητα σε όλη τη διαδικασία όπως ο προγραμματισμός πτήσης, η γεωαναφορά και ο έλεγχος του μοντέλου και το λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η περιοχή της εφαρμογής, το Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. Αφού γίνει μια σύντομη αναφορά στο χώρο, αναλύονται όλες εκείνες οι ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν πριν την πτήση και περιλαμβάνουν τον απαραίτητο εξοπλισμό, την σήμανση και μέτρηση των φωτοσταθερών και τέλος την μελέτη του νομικού πλαισίου που διέπει αυτές τις πτήσεις.
- Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται αναλυτικά όλη η διαδικασία επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων, οι παράγοντες που λήφθηκαν υπόψιν καθώς και οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για κάθε δεδομένο στάδιο. Τέλος, γίνεται μια εκτενής σύγκριση του μοντέλου με το αντίστοιχο γεωδαιτικό αναφέροντας παράλληλα και όλες τις δυσκολίες και προβλήματα που παρουσιάστηκαν στο στάδιο των εργασιών γραφείου.
- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας, προτάσεις για το σύνολο της εφαρμογής καθώς επίσης και ποια είναι η χρησιμότητα αυτής για τον Αγρονόμο και Τοπογράφο μηχανικό.

ABSTRACT

CREATION OF 3D PLAN USING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

Application at Lavrion Technological and Cultural Park

The aim of this diploma thesis is to create a three-dimensional model using unmanned aircraft systems known as UAVs. This model will be georeferenced in the Greek Geodetic Reference System of 1987 (GGRS'87) and will be compared with a corresponding three-dimensional model produced by geodetic and terrestrial methods.

The thesis is divided into four chapters structured as follows:

- The **first chapter** describes the Structure from Motion (SfM) problem with which the three-dimensional model is being reconstructed. At the same time, the necessary steps needed throughout the process are described such as flight planning, georeferencing and model evaluation, and data processing software.
- The **second chapter** presents the area of application, the Lavrion Technological and Cultural Park. After a short reference to the site, all the actions that must be taken into account before the flight are analyzed and include the necessary equipment, the marking and measurement of the ground control points and finally the study of the legal framework governing these flights.
- The **third chapter** describes in detail the processing stages of the primal data, the factors taken into consideration as well as the variables selected for each given stage. Finally, an extensive comparison of the 3D model with the corresponding geodetic is presented, while at the same time all the difficulties and problems presented at the stage of office work are detailed.
- In the **fourth chapter**, conclusions of this diploma thesis are presented as well as proposals for the whole application and its advantages for the Rural and Survey engineer.

After data analysis and processing there are some useful conclusions to be referenced:

- a) Processing photographs with computer vision algorithms is an extremely resource intensive task for any given personal computer. Therefore, a powerful system is recommended for optimal results. The lack of these resources can lead to a worse than ideal accuracy.
- b) Georeferencing using already measured in the field points of building details is not recommended. The user cannot verify the exact spot of measurement in the photogrammetric process, a fact that diminishes the result. Using special coded targets with stable and known geometry is the optimal solution.
- c) For shadow extinction and a better overall look of the 3D model it is suggested to perform the flight during cloudy days. The diffusing sun creates uniform source of luminance. Windy days are not suggested first and foremost to avoid image blur and then for better GPS positioning.
- d) It is possible to extract points and their coordinates from the 3D model, but the user must always take into account the product scale of his application. However, it is advisable, if more accuracy is needed, that these coordinates be further corrected by altering the placing of the marker in the photographs from the processing software.

As far as the usefulness of such an application is concerned, comparing the working time in both the field and the office, time and money are saved for the engineer. Staying in the field for the acquisition of primal data takes up to one day while office work needs the same amount of time. Instead, to create a three-dimensional topographic diagram, field and office work can take up to a week.

However, if a three-dimensional topographic diagram is needed, the details that cannot be measured by a total station can be supplemented by a photogrammetric three-dimensional model. At the same time the photogrammetric processing will be able to provide information on the textures and colors of the objects as well as a digital elevation model and orthophoto map for the area.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τριδιάστατος χώρος αποτελεί ένα σύνθετο σύνολο αντικειμένων με συγκεκριμένη γεωμετρία και χαρακτηριστικά. Είναι ο χώρος μέσα στον οποίο ζει και αλληλοεπιδρά ο άνθρωπος γι' αυτό και τον κατανοεί και αντιλαμβάνεται πλήρως.

Η δημιουργία τοπογραφικών διαγραμμάτων ή μοντέλων σε δυο διαστάσεις είναι κάτι συνηθισμένο για τους μηχανικούς. Όμως, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια έχει ανοίξει νέους ορίζοντες για το επάγγελμα και τον τρόπο με τον οποίο εκτελούν και παρουσιάζουν τη δουλειά τους. Αυτό οδήγησε στη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων, με επίγειες ή εναέριας μεθόδους, που ανταποκρίνονται στο φυσικό αντικείμενο και παράλληλα δίνουν πολύ περισσότερες επιλογές επεξεργασίας και εξαγωγής πληροφορίας.

Ταυτόχρονα, τα σύγχρονα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών είναι πλέον οικονομικά προσιτά και πολύ εξελιγμένα για να αναλάβουν την φωτογραφική αποτύπωση μεγάλων εκτάσεων σε σύντομο χρόνο και με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι αλγόριθμοι που ανακατασκευάζουν τον τριδιάστατο χώρο από διδιάστατες φωτογραφίες έχουν βελτιστοποιηθεί αρκετά ώστε να παράγουν το τριδιάστατο αντικείμενο γρήγορα και αποτελεσματικά.

Το πιο σημαντικό όμως για το μηχανικό είναι η ακρίβεια και η ορθότητα του τελικού προϊόντος που παραδίδει, ακρίβεια η οποία έχει βελτιωθεί σημαντικά λόγω των εξελίξεων που αναφέρθηκαν και είναι πλέον άμεσα συγκρίσιμη με τις ακρίβειες των επίγειων γεωδαιτικών μεθόδων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραγωγή τριδιάστατου μοντέλου αστικού χώρου από φωτογραφίες που αποκτήθηκαν με εναέριας μεθόδους, κάνοντας χρήση UAV, και η σύγκριση του με αντίστοιχο τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα που παράχθηκε με γεωδαιτικές μεθόδους.

Η σύγκριση αυτή γίνεται τόσο οπτικά όσο και μετρητικά λαμβάνοντας υπόψιν και όλες τις διευκολύνσεις ή εμπόδια που μπορεί να παρουσιάσει κάθε προσέγγιση ξεχωριστά. Τέλος, αξιολογείται η διαδικασία όσον αφορά στο χρόνο αλλά και στο αποτέλεσμα με όλα τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν σε κάθε στάδιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

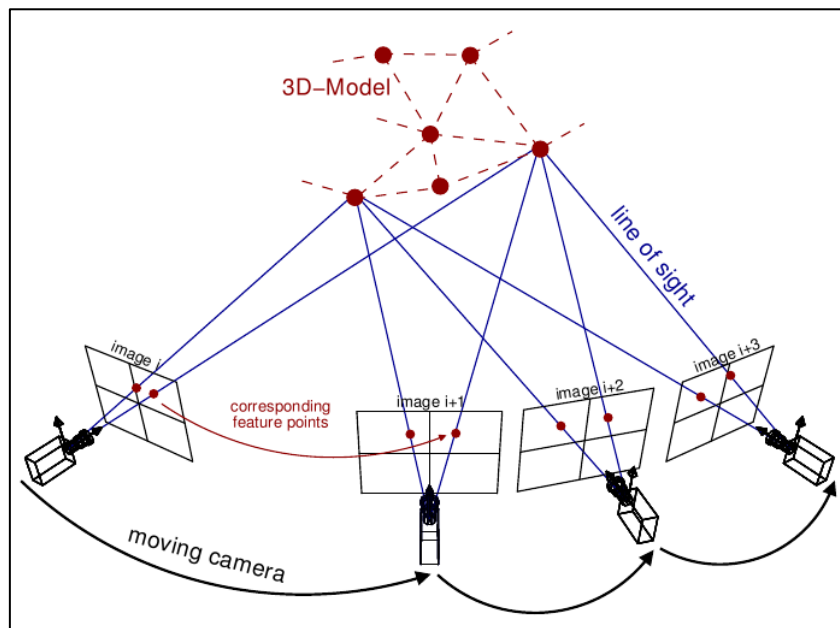
ΤΟ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

1.1 Γενικά

Για την δημιουργία ενός τριδιάστατου τοπογραφικού ή αλλιώς ενός τριδιάστατου μοντέλου απαιτούνται ποικίλες εργασίες υπαίθρου, αλλά και γραφείου. Αρχικά όμως, είναι απαραίτητη η κατανόηση των σταδίων και των παραμέτρων δημιουργίας ενός αντικειμένου στο τριδιάστατο χώρο.

Το πρόβλημα που θα αντιμετωπιστεί σε αυτό το κεφάλαιο είναι το πως μπορούν αντιστοιχίες μεταξύ σημείων διδιάστατων φωτογραφιών να προσδιορίσουν σημείο στο τριδιάστατο χώρο όταν κάθε όψη μιας φωτογραφίας αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστή κάμερα. Αναζητείται δηλαδή, ποια είναι η καταλληλότερη διάταξη καμερών και τριδιάστατων σημείων, τα οποία σχετιζόμενα μεταξύ τους μέσω των εξισώσεων προοπτικής προβολής προσεγγίζουν χωρικά τις δοσμένες αντιστοιχίες των διδιάστατων εικόνων. Η προσέγγιση αυτή εκφράζεται μέσω του σφάλματος επαναπροβολής και το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία με την ονομασία “Structure from Motion (SfM)” [Μελανίτης Ν., 2014]

Ένας πιο τυπικός ορισμός για το SfM (εικόνα 1.1) είναι η εκτίμηση της γεωμετρίας ενός τριδιάστατου άκαμπτου αντικειμένου με σχετική κίνηση της κάμερας, λαμβάνοντας ως δεδομένα διδιάστατες εικόνες. Στην παρούσα εφαρμογή η λήψη των εικόνων γίνεται με UAV (drone).

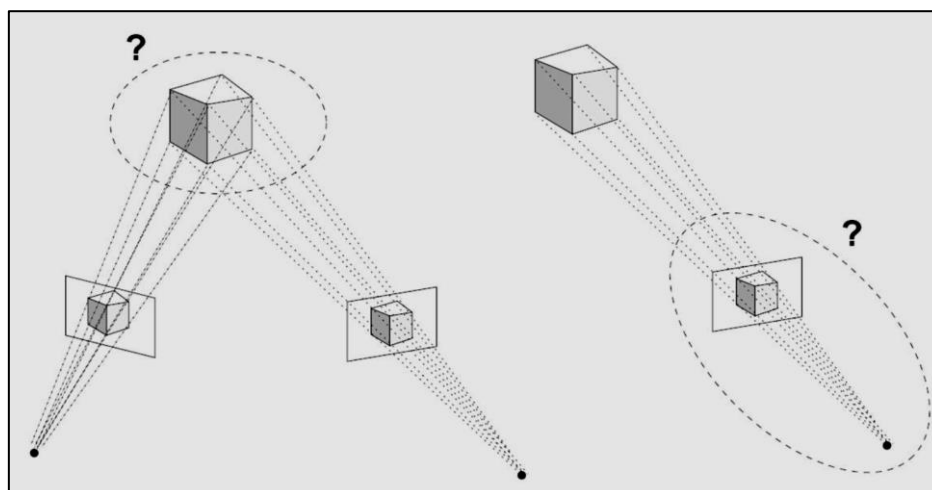


Εικόνα 1.1: Πρόβλημα SfM

Το drone είναι εξοπλισμένο με κάμερα και κατάλληλο λογισμικό το οποίο του επιτρέπει να πραγματοποιεί πτήση με συγκεκριμένη πορεία και να κάνει φωτογραφικές λήψεις με προκαθορισμένες από το χρήστη επικαλύψεις.

Συνήθως οι εξωτερικές παράμετροι της κάμερας είναι γνωστές, χάρη στον δέκτη GPS που περιλαμβάνουν τα drone, ωστόσο πολλές φορές τόσο οι εσωτερικές όσο και οι εξωτερικές παράμετροι πρέπει να υπολογιστούν ξανά κατά την διαδικασία της επεξεργασίας. Η λύση αυτή επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη επίλυση δύο πολύ γνωστών προβλημάτων της φωτογραμμετρίας, την οπισθοτομία και την εμπροσθοτομία (εικόνα 1.2).

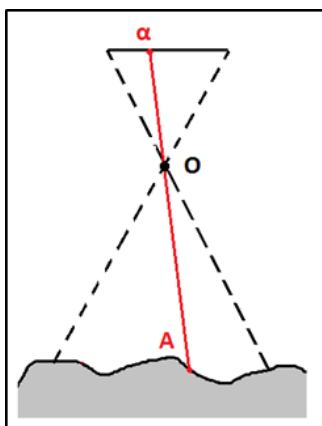
Οπισθοτομία είναι η διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων των σημείων λήψης αλλά και του προσανατολισμού των αξόνων λήψης των φωτογραφιών. Αντίθετα, εμπροσθοτομία είναι η διαδικασία με την οποία προσδιορίζονται οι γεωδαιτικές συντεταγμένες σημείων του κάθε στερεοζεύγους.



Εικόνα 1.2: Εμπροσθοτομία (αριστερά) και οπισθοτομία (δεξιά)

Προκειμένου να προσδιοριστεί με ακρίβεια η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων θα αξιοποιηθεί η συνθήκη της συγγραμμικότητας. Η σχέση αυτή συνδέει σημεία πάνω στην φωτογραφία με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το σημείο O είναι το σημείο λήψης της φωτογραφίας, ενώ τα a και A τα σημεία στη φωτογραφία και στο έδαφος αντίστοιχα (εικόνα 1.3). [Πατιάς Π., 1991]

Η χρήση αυτής της εξίσωσης δίνει ακριβή λύση και όχι προσεγγιστική, επομένως προτιμάται σε εργασίες υψηλής ακρίβειας των τελικών προϊόντων. [Kraus K., 2010]



Εικόνα 1.3: Η συνθήκη συγγραμμικότητας

Το πρόβλημα του SfM αντιμετωπίζεται ακολουθώντας μια συγκεκριμένη σειρά βημάτων και ενεργειών. Οι ενέργειες που πραγματοποιούνται είναι:

1. Εντοπισμός και εξαγωγή χαρακτηριστικών ομόλογων σημείων μεταξύ των εικόνων. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως συνταύτιση σημείων (Matching)
2. Προσαρμογή του κατάλληλου γεωμετρικού μοντέλου. Στα συνταυτισμένα σημεία εφαρμόζεται η επιπολική γεωμετρία και προσδιορίζονται οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού, ο προσανατολισμός των εικόνων και ένα αρχικό αραιό νέφος συνταυτισμένων σημείων (Sparse Point Cloud).

Με την ολοκλήρωση των δύο παραπάνω σταδίων επιτυγχάνεται η ευθυγράμμιση ή Alignment όπως αλλιώς ονομάζεται και αποκαθίστανται ο εσωτερικός και ο σχετικός προσανατολισμός των εικόνων χρησιμοποιώντας ομόλογα σημεία και όχι φωτοσταθερά. Επομένως το μοντέλο είναι σε αυθαίρετο σύστημα αναφοράς με αυθαίρετη κλίμακα, θέση και προσανατολισμό. Για την αποκατάσταση και του απόλυτου προσανατολισμού του μοντέλου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και το τρίτο στάδιο.

3. Γεωαναφορά νέφους σημείων στο οποίο στάδιο θα γεωαναφερθεί το μοντέλο και θα του δοθεί ορθή κλίμακα, θέση και προσανατολισμός στο χώρο καθώς θα ενταχθεί στο σύστημα αναφοράς που επιθυμεί ο μηχανικός. Αυτή η γεωαναφορά απαιτεί την χρήση τουλάχιστον δύο πλήρη φωτοσταθερών (X,Y,H) και ενός υψομετρικού (H), ώστε να εφαρμοστεί ένας τριδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας.

4. Πυκνή συνταύτιση σημείων. Το αρχικό αραιό νέφος σημείων θα πυκνωθεί με την ανίχνευση επιπλέον συνταυτισμένων σημείων. Με την χρήση ποικίλων αλγόριθμων δημιουργείται ένα πυκνό νέφος, ή αλλιώς ένα Dense Point Cloud.

5. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου. Πραγματοποιείται ένωση των σημείων του πυκνού νέφους, δημιουργώντας τρίγωνα. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί την επιφάνεια του μοντέλου και είναι γνωστή ως Meshing.

6. Δημιουργία υφής. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου σημαντική είναι η φωτορεαλιστική απεικόνιση του. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Texturing και ολοκληρώνει το μοντέλο οπτικά.

Στις παρακάτω παραγράφους θα περιγραφεί αναλυτικά το κάθε στάδιο, περιλαμβανομένων των εξισώσεων επίλυσης αλλά και των διάφορων μεθόδων με τις οποίες αυτή επιτυγχάνεται.

1.2 Τα στάδια δημιουργίας του 3D μοντέλου

- Συνταύτιση σημείων

Συνταύτιση σημείων είναι πρακτικά η εύρεση και η συσχέτιση των κοινών σημείων μεταξύ των φωτογραφιών. Τα σημεία αυτά βρίσκονται στα επικαλυπτόμενα τμήματα των φωτογραφιών και αποτελούν σημεία σύνδεσης τους. Στο παρόν στάδιο, κάθε φωτογραφία συγκρίνεται με τις υπόλοιπες ώστε να εντοπιστούν τα κοινά τους σημεία.

Στην περίπτωση που τα συστήματα UAV έχουν ενσωματωμένο GPS, ο αλγόριθμος συσχέτισης των εικόνων αποκλείει συνδυασμούς φωτογραφιών που δεν είναι πιθανοί και έτσι ελαχιστοποιεί τον χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

Συνήθως γίνεται εντοπισμός βάσει ομοιότητας. Στην περίπτωση αυτή συγκρίνεται μία μικρή περιοχή (παραθύρο) γύρω από κάθε pixel ενδιαφέροντος. Κάθε pixel χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα που περιέχει τις τιμές έντασης όλων των pixel του παραθύρου. Έτσι εκτελείται ο παραπάνω εντοπισμός, πραγματοποιώντας αντιστοιχίσεις των ίδιων παραθύρων, παίρνοντας ως παραδοχή ότι κάθε σημείο του παραθύρου εκτελεί την ίδια κίνηση.

Πολλές φορές όμως, λόγω της μη έντονης μεταβολής της έντασης των περιοχών που επιλέχθηκαν, ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει το λεγόμενο πρόβλημα του διαφράγματος και έτσι δεν εφαρμόζεται αποτελεσματικά. Για τον λόγο αυτό απαιτείται να περιοριστεί ο χώρος αναζήτησης των κοινών σημείων χρησιμοποιώντας το επιπολικό επίπεδο. [Δρόσος Σ., 2015]

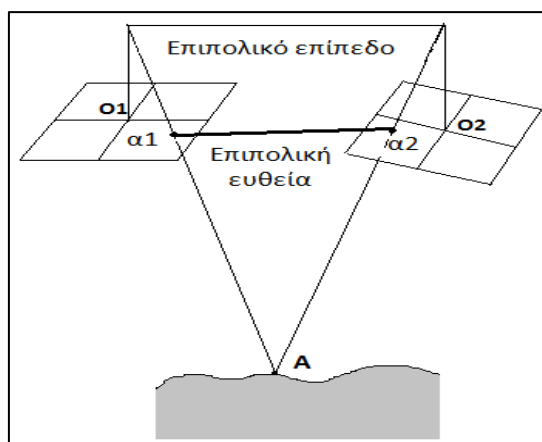
Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι εντοπισμού κοινών σημείων. Αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στους αλγόριθμους εντοπισμού γωνιών οι οποίοι επιλέγουν σημεία που ξεχωρίζουν σε σχέση με τα γειτονικά τους, βάσει της φωτεινότητας τους. Ωστόσο δεν είναι πλήρως αποτελεσματικοί μιας και εντοπίζουν σημεία σε συγκεκριμένες περιοχές των φωτογραφιών. Τέτοια αλγόριθμοι είναι ο Harris και ο Canny.
- Στους αλγόριθμους εντοπισμού χαρακτηριστικών σημείων οι οποίοι αν και είναι πιο χρονοβόροι, υπολογίζουν σημεία με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (σημεία αμετάβλητης κλίμακας και περιστροφής, υψηλής αντίθεσης) και μεγάλη ακρίβεια. Πιο γνωστοί είναι ο SURF και ο SIFT.

- Προσαρμογή γεωμετρικού μοντέλου

Με την προσαρμογή του γεωμετρικού μοντέλου, αξιοποιώντας τα συνταυτισμένα σημεία προσδιορίζονται τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού, οι σχετικές θέσεις των φωτομηχανών στον τριδιάστατο χώρο αλλά και ένα αρχικό αραιό νέφος συνταυτισμένων σημείων.

Για τον προσδιορισμό αυτό απαιτείται γνώση επιπολικής γεωμετρίας. Επιπολικό επίπεδο για ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών είναι το επίπεδο που διέρχεται από τα προβολικά κέντρα των δύο εικόνων και από το σημείο A που τέμνει τις δύο φωτογραφίες κατά μήκος της ευθείας $\alpha_1\alpha_2$. Αντίστοιχα επιπολική ευθεία είναι η ευθεία $\alpha_1\alpha_2$, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4 παρακάτω.



Εικόνα 1.4: Ορισμός επιπολικού επιπέδου και επιπολικής ευθείας

Έτσι με τον καθορισμό της παραπάνω επιπολικής ευθείας καθορίζεται η θέση των καμερών. Όσο πιο πολλά είναι τα κοινά σημεία, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της θέσης λήψης των φωτογραφιών.

Υπάρχει ποικιλία αλγόριθμων που επιλύουν το παραπάνω πρόβλημα, με πιο γνωστό αυτό των 8 σημείων, ο οποίος απαιτεί 8 κοινά σημεία, χωρίς θόρυβο, στις δύο εικόνες και επιλύει ένα γραμμικό σύστημα με σχετικά καλή ακρίβεια. Στην περίπτωση των περισσότερων από δύο λήψεων χρησιμοποιείται ένας μη γραμμικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, με πιο γνωστό του Levenberg-Marquardt (LM), που επιλύει το πρόβλημα με μια συνάρτηση πολλαπλών μεταβλητών, εκφρασμένη ως άθροισμα τετραγώνων μη-γραμμικών πραγματικών συναρτήσεων. [Παπαχρήστου Η., 2004]

Τέλος τα συνταυτισμένα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μοντέλου αποτελούν ένα αρχικό αραιό νέφος σημείων το οποίο θα πυκνωθεί στο επόμενο στάδιο. Στην περίπτωση που καθίσταται αναγκαία η γεωαναφορά του νέφους θα πραγματοποιηθεί ένας τριδιάστατος μετασχηματισμός ομοιότητας του μοντέλου στο απαιτούμενο (γεωδαιτικό) σύστημα αναφοράς. [Βέργος Κ., 2015]

- Πύκνωση συνταυτισμένων σημείων

Για ένα ρεαλιστικό και ακριβές αποτέλεσμα απαιτείται ένα πυκνό νέφος σημείων, όπως αυτό προκύπτει από τις προσανατολισμένες, πλέον, εικόνες. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι ώστε να πραγματοποιηθεί η πύκνωση αυτή.

Ένας από αυτούς στηρίζεται στη συσχέτιση μικρών παραθύρων κατά μήκος της επιπολικής ευθείας. Επιπλέον υπάρχουν τεχνικές που δουλεύουν με την ιεραρχία των πυραμίδων της εικόνας, αναγνωρίζοντας κοινά σημεία με διαδοχικές αντιστοιχίσεις με βάση την έκταση και με εικόνες βάθους. Τέλος οι πιο διαδεδομένες τεχνικές αντιστοιχούν κοινά σημεία στο επικαλυπτόμενο τμήμα των φωτογραφιών, ανεξάρτητα από τις αλλαγές φωτισμού.

Όποιος αλγόριθμος και να επιλεγεί, το στάδιο αυτό είναι το πιο χρονοβόρο και ανάλογα το λογισμικό επεξεργασίας και την υπολογιστική ισχύ μπορεί να χρειαστεί πάνω από 24 ώρες για να ολοκληρωθεί.

Με το πέρας της πύκνωσης και την απόκτηση του dense point cloud ο μηχανικός αρχίζει και έχει μια πρώτη όψη του τριδιάστατου μοντέλου. Το πυκνό αυτό νέφος σημείων είναι σημαντικό καθώς χρησιμοποιείται ως

βάση για την δημιουργία και άλλων παραγώγων όπως είναι το μοντέλο επιφανειών ή το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

- Δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου και Υφής

Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία του τελικού νέφους σημείων, απαιτείται η δημιουργία της επιφάνειας του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται ενώνοντας όλα τα σημεία μεταξύ τους, δημιουργώντας τρίγωνα.

Όλοι οι αλγόριθμοι δημιουργίας των παραπάνω τριγώνων χρησιμοποιούν την τεχνική του Polygonal Mesh. Αυτοί χρειάζονται ένα σημείο εκκίνησης και επαρκή αριθμό σημείων.

Οι πιο γνωστοί από αυτούς είναι ο Delaunay Triangulation για διδιάστατο τριγωνισμό, ο Tetrahedralization για τριγωνισμό τετράεδρων, η Poisson Method ή η Ball Pivoting Method.

Στο τέλος δημιουργείται η υφή του μοντέλου, αποδίδοντας μια πιο φωτορεαλιστική απεικόνιση. Οι RGB τιμές του κάθε pixel των ταυτισμένων σημείων, αντιστοιχίζονται στην επιφάνεια που έχει προκύψει από το ψηφιακό μοντέλο και έτσι ολοκληρώνεται η επίλυση του προβλήματος SfM.

1.3 Συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών-UAS

Τα συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (ΣμηΕΑ-UAS) ή αλλιώς drone είναι μικρά ιπτάμενα οχήματα πολυλειτουργικού χαρακτήρα. Είναι ένα μέσο, συνήθως εφοδιασμένο με κάμερα, το οποίο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, ημιαυτόνομα ή τελείως χειροκίνητα με τηλεχειριστήριο και να πραγματοποιεί φωτογραφικές λήψεις.

Πρόκειται δηλαδή για ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για διασκέδαση είτε ακόμα και για επαγγελματική χρήση. Η πλατφόρμα των μέσων αυτών, μπορεί να είναι επιπλέον εξοπλισμένη με συστήματα εντοπισμού και πλοήγησης, κλισίμετρα, και άλλους διάφορους αισθητήρες.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει ένας διαχωρισμός της έννοιας UAV και UAS. Το UAV (unmanned aerial vehicle) είναι το αεροσκάφος αυτό καθ' εαυτό, δηλαδή το drone, και αποτελεί το βασικό μέρος των UAS.

Η έννοια του UAS (unmanned aircraft system) είναι στην ουσία τα ΣμηΕΑ και ο όρος περιλαμβάνει το σύνολο των επιμέρους στοιχείων που βοηθάνε στη λειτουργία και πτήση του αεροσκάφους. Τα στοιχεία αυτά είναι ο χειριστής και ο δίαυλος επικοινωνίας ανάμεσα σε αυτόν και το όχημα δηλαδή το τηλεχειριστήριο.

Η λέξη drone, ωστόσο, δεν έχει κάποια σημασιολογική έννοια παρά πηγάζει από την αγγλική λέξη *drum* που δηλώνει τον ήχο που παράγει ένα σμήνος από μέλισσες, τον ίδιο ήχο που παράγει και ένα ιπτάμενο όχημα με ρότορες.

Τα UAV κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος, το βάρος και τη διάρκεια πτήσης τους η οποία εξαρτάται από την μπαταρία που διαθέτουν. Επίσης ποικίλουν ανάλογα με το ύψος πτήσης που μπορούν φτάσουν, την εμβέλεια χειρισμού που παρέχουν αλλά και το πιο σημαντικό, τη χρήση τους.

Ωστόσο οι εναέριες αυτές πλατφόρμες χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες:

- Σταθερών πτερυγίων όπου το όχημα διαθέτει σταθερά φτερά, όπως τα συνηθισμένα αεροπλάνα και προσφέρει μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης σε υψηλότερες ταχύτητες. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η απλούστερη δομή, από αυτή των πολλαπλών στροφείων, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου λειτουργίας τους με χαμηλότερο κόστος.
- Πολλαπλών στροφείων που περιλαμβάνουν περισσότερα από 2 στροφεία και πολλές φορές φτάνουν μέχρι τα 12-16. Αυτά προτιμώνται για εργασίες μεγάλης κλίμακας, καθώς πετούν σε χαμηλότερα ύψη πτήσης. Μεγάλο πλεονέκτημα τους είναι η σταθερότητα τους και η δυνατότητα της κατακόρυφης κίνησης τους.

Στην εικόνα 1.5 παρουσιάζονται πλατφόρμες σταθερών φτερών, ενώ στην εικόνα 1.6 μερικές πλατφόρμες πολλών στροφείων.



Εικόνα 1.5: UAV Πλατφόρμες σταθερών φτερών (δεξιά: Hubsan Spy Hawk H301S, αριστερά: senseFly eBee)



Εικόνα 1.6: UAV Πλατφόρμες πολλαπλών στροφείων (δεξιά πάνω: DJI Phantom 3 Standard, αριστερά πάνω: DJI Mavic Pro, δεξιά κάτω: Yuneec Typhoon H Pro, αριστερά κάτω: DJI Spreading Wings S900)

Ανάλογα, λοιπόν, την εκάστοτε εφαρμογή, ο μηχανικός είναι σε θέση να διαλέξει το κατάλληλο μηχανισμό UAV προκειμένου να του έχει το αποτέλεσμα που επιθυμεί.

Πρέπει ωστόσο να λάβει υπόψιν ότι για ένα τριδιάστατο μοντέλο, ένα μπλοκ κατακόρυφων λήψεων (ναδιρικών) μπορεί να μην αρκεί. Απαιτείται και η πλάγια λήψη του αντικειμένου (υπό γωνία), προκειμένου να συμπληρωθεί η πληροφορία των όψεων του.

1.4 Προγραμματισμός πτήσης

Με την έννοια του προγραμματισμού πτήσης, νοείται το σύνολο των αποφάσεων που πρέπει να ληφθούν σχετικά με την επιλογή του UAV, την κλίμακα απόδοσης, την λήψη των φωτογραφιών, την γεωμετρία της λήψης, τον αριθμό και την επικάλυψη των φωτογραφιών. Οι αποφάσεις αυτές για να είναι βέλτιστες πρέπει να ληφθεί υπόψιν η περιοχή μελέτης, τα υφιστάμενα φωτοσταθερά, ο χρόνος πτήσης, η στερεοσκοπική κάλυψη αλλά και ο σκοπός για τον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία.

Εάν το τελικό προϊόν πρέπει να είναι ένας ορθοφωτοχάρτης τότε ο προγραμματισμός της πτήσης ακολουθεί όλα τα παραπάνω βήματα προκειμένου να είναι ο βέλτιστος δυνατός. Παρόλα αυτά, είναι εφικτή η περάτωση της διαδικασίας και χωρίς να ληφθούν όλες οι παράμετροι υπόψιν παρά μόνο οι επιθυμητές επικαλύψεις, όπως θα αναλυθεί και θα

γίνει κατανοητό παρακάτω. Στην περίπτωση όμως που σκοπός της πτήσης του UAV είναι η απόκτηση δεδομένων για σύνταξη τριδιάστατου μοντέλου μιας περιοχής τότε ο προγραμματισμός της πτήσης ακολουθεί διαφορετική πορεία, στην οποία ο χειριστής επεμβαίνει λίγο ή και εξ' ολοκλήρου.

Σε μια κλασική φωτογραμμετρική διαδικασία πρέπει να καθορίζονται κάποιες παράμετροι της πτήσης πριν την εκτέλεση της. Αυτό γίνεται προκειμένου να υπάρχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Παρουσιάζονται παρακάτω οι βασικές παράμετροι του προγραμματισμού πτήσης που λαμβάνονται υπόψιν:

- Για την κλίμακα της φωτογραφίας:

$$1:S = \frac{c}{H} = \frac{d}{D} \quad (1.1)$$

όπου 1:S η κλίμακα, c η σταθερά της μηχανής, H το ύψος πτήσης, d το πλάτος της φωτογραφίας και D το πλάτος της φωτογραφίας στο έδαφος.

- Το ύψος πτήσης:

$$H = c \frac{D}{d} = cS \quad (1.2)$$

- Την απόσταση από το έδαφος:

$$D = dS = \frac{dH}{c} \quad (1.3)$$

- Την περιοχή στο έδαφος που καλύπτει μία φωτογραφία:

$$E_{\varepsilon} = D^2 = d^2 S^2 \quad (1.4)$$

- Το μήκος βάσης b με p% κατά μήκος επικάλυψη:

$$b = D \left(1 - \frac{p}{100} \right) \quad (1.5)$$

- Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών γραμμών πτήσης με q% κατά πλάτος επικάλυψη:

$$a = D \left(1 - \frac{q}{100} \right) \quad (1.6)$$

- Τον αριθμό των αεροφωτογραφιών m ανά λωρίδα:

$$m = \frac{I_p}{b} + 1 \quad (1.7)$$

όπου I_p το μήκος της λωρίδας

- Τον αριθμό των λωρίδων n :

$$n = \frac{I_q - D}{b} + 1 \quad (1.8)$$

όπου I_q το πλάτος της περιοχής

- Το εμβαδόν του στερεομοντέλου:

$$E_\mu = (D - b)D \quad (1.9)$$

- Την περιοχή που μπορεί να εξεταστεί στερεοσκοπικά:

$$E = ab = D^2 \left(1 - \frac{p}{100}\right) \left(1 - \frac{q}{100}\right) \quad (1.10)$$

- Τον αριθμό των φωτογραφιών:

$$n = \frac{E_a}{E} \quad (1.11)$$

όπου E_a η περιοχή του εδάφους που πρέπει να φωτογραφηθεί

- Το χρονικό διάστημα Δt μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων:

$$\Delta t = \frac{b}{v} = \frac{dS}{v} \left(1 - \frac{p}{100}\right) \quad (1.12)$$

όπου v η ταχύτητα πτήσης του drone

Αυτές οι παράμετροι αφορούν τις κατακόρυφες λήψεις, με γωνία λήψης τις 90° , με την επικάλυψη να καθορίζεται πολλές φορές από το λογισμικό επεξεργασίας των φωτογραφιών ή και από το χρήστη. Όσον αφορά τις πλάγιες λήψεις, αυτές απαιτούν την ίδια επικάλυψη, όμως

επιλέγεται διαφορετική γωνία λήψης, με αυτή να κυμαίνεται στις 45°-90° από το αντικείμενο.

Για μεγαλύτερη διευκόλυνση του προγραμματισμού πτήσης, διατίθενται λογισμικά, εμπορικά και ελεύθερα, εξειδικευμένα για αυτή τη διαδικασία.

Παραδείγματα τέτοιων λογισμικών είναι το Pix4D Capture (εικόνα 1.7) και το Drone Deploy. Σε αυτά τα προγράμματα, ο μηχανικός εισάγει ως δεδομένα την περιοχή προς φωτογράφιση, την επικάλυψη των εικόνων που επιθυμεί, την ταχύτητα πτήσης και την γωνία λήψης, και με αφετηρία κάποιο συγκεκριμένο σημείο πραγματοποιείται αυτόματη πλοήγηση.



*Εικόνα 1.7: Λογισμικό Pix4D Capture
(www.gisandbeers.com/pix4d-para-drones)*

Ο χρήστης έχει δυνατότητα παρακολούθησης από ενσωματωμένο ή μη tablet την εξέλιξη της διαδικασίας έχοντας την ευκαιρία να επέμβει όπου εκείνος επιθυμεί. Τα λογισμικά που αναφέρθηκαν παραπάνω είναι διαθέσιμα σε Android και iOS πλατφόρμες και μπορούν να συνδεθούν με διάφορα drone.

Τέλος, πριν από την πτήση του μη επανδρωμένου οχήματος, κρίνεται σκόπιμο να διερευνώνται οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, καθώς πρέπει να επιλέγονται μέρες που να μην υπάρχει κίνδυνος βροχόπτωσης ή άνεμοι. Αυτό, διότι υπάρχει κίνδυνος τόσο για καταστροφή του ιπτάμενου οχήματος αν αναποδογυρίσει όσο και πιθανότητα πρόκλησης βλάβης σε κάποιον άνθρωπο από ανεξέλεγκτη πορεία πτήσης.

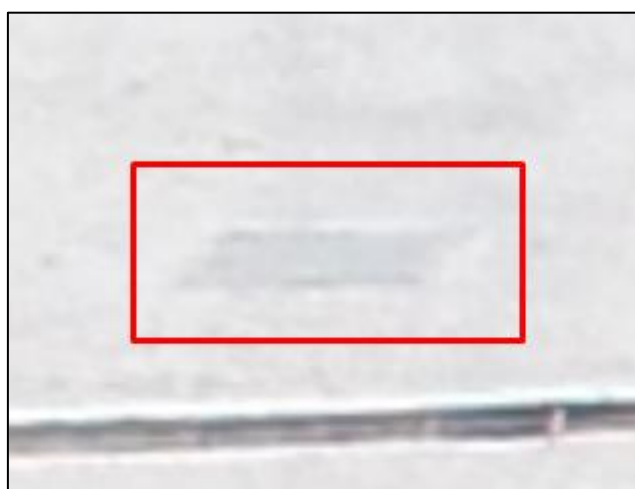
Πέρα από την επιλογή της κατάλληλης μέρας, θα πρέπει να επιλέγεται και η κατάλληλη ώρα μέσα στη μέρα για πτήση και λήψη των απαραίτητων δεδομένων.

Οι σκιές που δημιουργούνται τις πρώτες πρωινές ώρες της ημέρας όπως επίσης και το απόγευμα πριν τη δύση του ήλιου έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο τελικό προϊόν. Η επίδραση τους βέβαια είναι μεγαλύτερη στις ναδρικές λήψεις και στον οπτικό παράγοντα, αφού οι σκιές θα φαίνονται στο τελικό μοντέλο, παρά στη διαδικασία ανακατασκευής και την ακρίβεια αυτής.

Συνεπώς κρίνεται ιδανική η λήψη φωτογραφιών κατά τη διάρκεια μιας συνεφιασμένης μέρας ή έστω κατά τη διάρκεια των ωρών που ελαχιστοποιούνται οι σκιές, δηλαδή το μεσημέρι.

Επιπροσθέτως, οι μεταλλικές επιφάνειες όπως και οι ανοιχτόχρωμες όταν φωτίζονται από το ήλιο υπό γωνία δημιουργούν μεγάλη αντανάκλαση και η έντονη φωτεινότητα στη φωτογραφία με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται η γεωμετρία και το χρώμα τους. Πέρα από τα σημεία αυτά όμως η φωτογραφία όταν παρουσιάζει περιοχές με έντονη φωτεινότητα δεν βοηθάει τον αλγόριθμο του επιλεγμένου λογισμικού να κάνει συνταύτιση σημείων αφού όλα τα pixel μοιάζουν σχεδόν ίδια. Οι πλάγιες λήψεις είναι αυτές που υποφέρουν περισσότερο από το γεγονός αυτό αφού και οι ίδιες γίνονται υπό γωνία.

Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται ένα μεταλλικό φρεάτιο φωτιζόμενο υπό γωνία με ταυτόχρονη λήψη υπό γωνία. Η αντανάκλαση που δημιουργείται κάνει αδύνατο το ακριβή προσδιορισμό των γωνιών ακόμα και το διαχωρισμό αυτού από την άσφαλτο.



Εικόνα 1.8: Φρεάτιο φωτιζόμενο υπό γωνία

Όπως γίνεται κατανοητό η βέλτιστη επιλογή είναι να γίνονται φωτογραφικές λήψεις όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ του, ούτως ώστε να υπάρχει εξάλειψη των περισσότερων και μεγάλων σκιών αλλά και να μη

δημιουργούνται αντανάκλασεις από τη γωνία που φωτίζει ο ήλιος τα αντικείμενα της φυσικής επιφάνειας.

Τέλος, οι λήψεις θα πρέπει να τηρούν κάποιες συγκεκριμένες επικαλύψεις οι οποίες είτε ορίζονται εμπειρικά από το χρήστη είτε από το λογισμικό επεξεργασίας. Κάθε λογισμικό θέτει διαφορετικές προδιαγραφές όσον αφορά τις κατά μήκος και κατά πλάτος επικαλύψεις και πρέπει να τηρούνται εάν είναι εφικτό προκειμένου να μπορέσει ο αλγόριθμος να ανακατασκευάσει το τριδιάστατο μοντέλο και επιτυχία και ακρίβεια.

1.5 Γεωαναφορά μοντέλου

Αφού ολοκληρωθεί η μελέτη του προγραμματισμού πτήσης, πριν την έναρξη της, πρέπει να εντοπιστούν ιδανικά σημεία ή να δημιουργηθούν από την αρχή θέσεις κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά. Αυτό το στάδιο λαμβάνεται υπόψιν μόνο αν απαιτείται γεωαναφορά του τελικού προϊόντος.

Με την διαδικασία της γεωαναφοράς το μοντέλο εντάσσεται στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς, που συνήθως είναι το ΕΓΣΑ '87. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη σημείων (φωτοσταθερά) με γνωστές συντεταγμένες στο επιθυμητό σύστημα αναφοράς. Τα σημεία αυτά πρέπει να είναι ευδιάκριτα και εύκολα εντοπίσιμα στις φωτογραφίες που θα ληφθούν. Βρίσκονται τόσο στο έδαφος όσο και στις όψεις των κτιρίων σε ακμές ή θέσεις με καλή γεωμετρία. Επιπλέον πρέπει να είναι ορθά κατανομημένα στην περιοχή μελέτης προκειμένου να πραγματοποιηθεί ακριβής επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού.

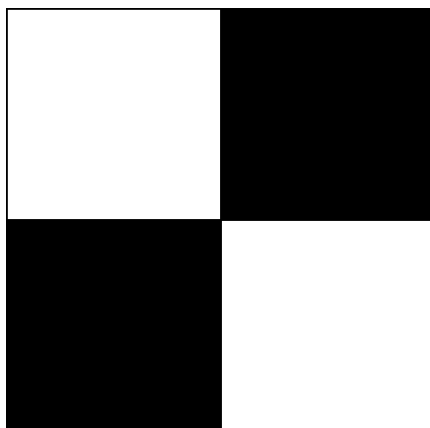
Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για μέτρηση των φωτοσταθερών εξαρτάται από τα διαθέσιμα σημεία γνωστών συντεταγμένων ή τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Στην περίπτωση που δεν απαιτείται ένταξη στο κρατικό σύστημα, τα σημεία που εγκαθίστανται στην περιοχή μελέτης ορίζουν ένα αυθαίρετο τοπικό δίκτυο, και έτσι η γεωαναφορά είναι σε αυθαίρετο σύστημα και αποκαθιστά μόνο τη κλίμακα του μοντέλου.

Η ένταξη όμως στο ΕΓΣΑ'87 απαιτεί επιπλέον την αποκατάσταση της θέσης και του προσανατολισμού του μοντέλου. Εάν η εφαρμογή απαιτεί μόνο φωτοσταθερά εδάφους τότε οι συντεταγμένες των θέσεων αυτών μπορούν να προσδιοριστούν με δορυφορικό εντοπισμό, μέσω σύνδεσης δέκτη GNSS με έναν μόνιμο σταθμό αναφοράς του συστήματος HEPOS. Με την χρήση GPS και αγορά των ομόλογων μετρήσεων του σταθμού αναφοράς για συγκεκριμένο χρόνο, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου αυτού με ακρίβεια 1 cm.

Από την άλλη, εάν χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά, σημεία σε όψεις κτιρίων είναι σημαντικό να ιδρυθεί οριζοντιογραφικό δίκτυο. Από τις στάσεις του δικτύου θα γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις προκειμένου να εξακριβωθούν τα σφάλματα κλεισίματος των οδεύσεων αλλά και να στοχευθούν τα αναγκαία φωτοσταθερά ώστε να υπολογιστούν οι συντεταγμένες τους. Η πύκνωση γίνεται με τον προσδιορισμό των συντεταγμένων δύο ή τριών κορυφών εκτός περιοχής ενδιαφέροντος και μεταφορά του δικτύου μέσα σε αυτήν με την μέτρηση οδεύσεων, ανοιχτών ή κλειστών.

Έτσι προσδιορίζονται σημεία στο έδαφος με γνωστές συντεταγμένες μέσα στην περιοχή μελέτης. Για τα σημεία στις όψεις των κτιρίων προτείνεται η αποτύπωση τους γεωδαιτικά με την χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού ο οποίος παρέχει και δυνατότητα μέτρησης μηκών χωρίς ανακλαστήρα.

Πριν τον προσδιορισμό συντεταγμένων των φωτοσταθερών ,όμως, πρέπει αυτά να σημειθούν στη φυσική γήινη επιφάνεια. Η σήμανση τους στο έδαφος, πρέπει να είναι ευδιάκριτη από μεγάλο ύψος και μόνιμη ή τουλάχιστον ημιμόνιμη αλλά διατηρητέα μέχρι το πέρας των εργασιών. Όσον αφορά τις θέσεις στις επιφάνειες των κτιρίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ειδικοί αυτοκόλλητοι στόχοι (εικόνα 1.9) είτε χαρακτηριστικά σημεία στις όψεις των κτιρίων. Το τελευταίο θα πρέπει να πραγματοποιείται με μεγάλη προσοχή καθώς πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα του ακριβούς προσδιορισμού της θέσης που στοχεύθηκε στη φυσική επιφάνεια το σημείο με τη ίδια θέση του σημείου στη φωτογραφία.



Εικόνα 1.9: Αυτοκόλλητος στόχος για σήμανση φωτοσταθερών κτιρίου

Για αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμη και χρήσιμη η δημιουργία αυτοσχέδιων υπαίθρου (κροκί). Τα σκαριφήματα αυτά μπορεί να είναι είτε κλασικά κροκί κατόψεων για τα σημεία στην φυσική γήινη επιφάνεια, είτε όψεων για τα σημεία στις επιφάνειες των κτηρίων, όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

Επιπλέον για χάρη ευκολίας στην περίπτωση των φωτοσταθερών στο έδαφος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποια φωτογραφία, όπως αυτή αντλήθηκε από το Google Earth και παρουσιάζεται παρακάτω (εικόνα 1.10), και απεικονίζει όλη την περιοχή μελέτης. Μία τέτοια εικόνα φαίνεται παρακάτω, όπου με κόκκινο σημειώνεται το περίγραμμα της και πορτοκαλί τα φωτοσταθερά που ιδρύθηκαν.



Εικόνα 1.10: Φωτογραφικό-εικονιστικό σκαρίφημα

1.6 Λογισμικά επεξεργασίας

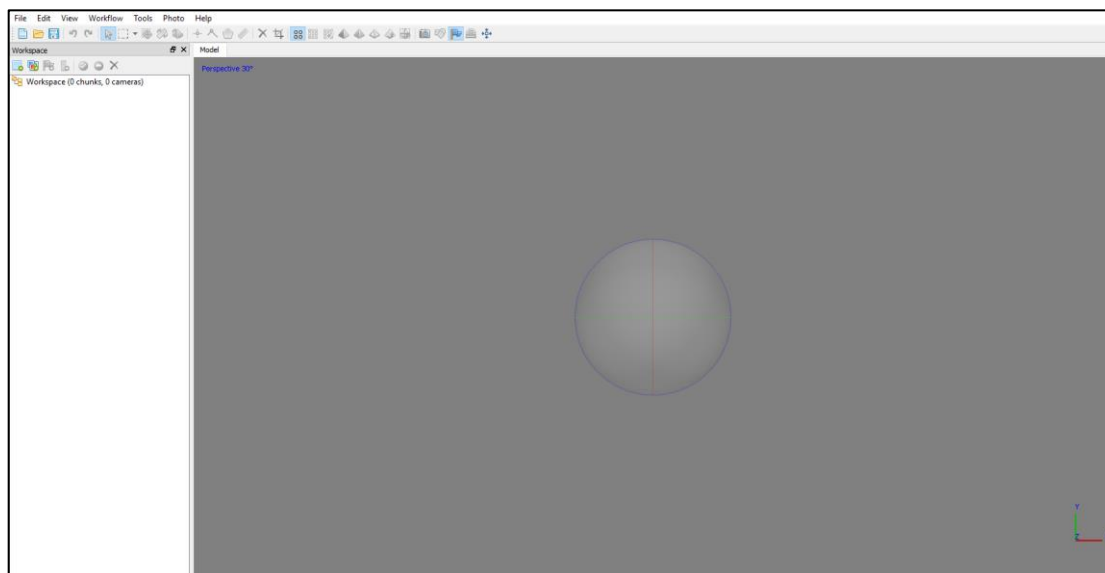
Υπάρχουν διάφορα λογισμικά για επεξεργασία δεδομένων και παραγωγή τριδιάστατων μοντέλων με τη μέθοδο SfM, όπως είναι το Pix4D, Agisoft PhotoScan, MicMac, MeshLab, κ.α.

Τα καλύτερα και πιο διαδεδομένα είναι το Pix4D και το PhotoScan τα οποία έχουν την ικανότητα δημιουργίας τόσο τριδιάστατων μοντέλων όσο και ορθοφωτοχαρτών. Είναι και τα δυο εμπορικά λογισμικά και διατίθενται επι πληρωμή. Στη παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε το PhotoScan καθώς έχει καλύτερα βελτιστοποιημένους αλγόριθμους για τη δημιουργία και ανακατασκευή μοντέλων. [2]

Το Agisoft PhotoScan (ευρέως γνωστό απλά ως PhotoScan) αποτελεί ένα επαγγελματικό πρόγραμμα για φωτογραμμετρικές επεξεργασίες. Έχει

αναπτυχθεί από την Agisoft LLC η οποία έχει τα κεντρικά της στην Αγία Πετρούπολη της Ρωσίας και το παραχωρεί στο χρήστη κατόπιν πληρωμής του τελευταίου για την απόκτηση άδειας. Κυκλοφόρησε το 2010 και υπάρχει έκδοση του και για τα τρία μεγάλα λειτουργικά συστήματα : Microsoft Windows, MacOS, Linux, ενώ εκτός από επαγγελματίες μηχανικούς χρησιμοποιείται ευρέως και από την κινηματογραφική βιομηχανία αλλά και από αυτή των βιντεοπαιχνιδιών.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα κυκλοφορεί σε δύο εκδόσεις, την βασική (standard) και την επαγγελματική (Pro). Η διαφορά ανάμεσα στις δύο εκδόσεις εντοπίζεται στο γεγονός ότι στην έκδοση Pro υπάρχουν περισσότερες επιλογές επεξεργασίας, δυνατότητες γεωαναφοράς και παραγωγής ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DSM/DTM) καθώς επίσης υποστήριξη γλώσσας προγραμματισμού Python για εκτέλεση κώδικα.



Εικόνα 1.11: Περιβάλλον εργασίας Agisoft PhotoScan Pro

Το περιβάλλον εργασίας του PhotoScan είναι απλό και οργανωμένο με τρόπο τέτοιο ώστε να διευκολύνει τη διαδικασία επεξεργασίας και να την κάνει ξεκάθαρη. Οι περισσότερες διεργασίες εκτελούνται μόνες τους χωρίς την συνεχή παρέμβαση του χρήστη. Παρόλα αυτά ο χρήστης πρέπει να ορίζει κάποιες παραμέτρους καθ' όλη τη διάρκεια της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας τόσο για εξοικονόμηση χρόνου όσο και για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος.

Γενικά το λογισμικό αυτό έχει την δυνατότητα να παράγει από τριδιάστατα μοντέλα μεγάλης λεπτομέρειας μέχρι ορθοφωτοχάρτες τεράστιας έκτασης και πολύ καλής ακρίβειας. Ωστόσο για να επιτευχθεί αυτό, το πρόγραμμα πρέπει να έχει στη διάθεση του πολλούς

υπολογιστικούς πόρους και χρόνο καθώς ορισμένες διεργασίες μπορεί να διαρκέσουν έως και 10 ώρες.



Εικόνα 1.12: Τριδιάστατο μοντέλο δέντρου (δεξιά) μετά από επεξεργασία φωτογραφιών πραγματικού δέντρου (αριστερά) στο PhotoScan (<https://www.thepixellab.net/3d-photo-scanning-overview-plus-freebies>)



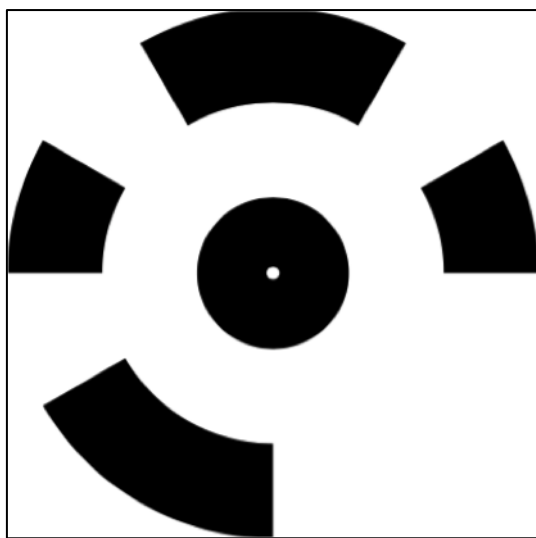
Εικόνα 1.13: Ορθοφωτοχάρτης παραγμένος στο PhotoScan (<https://www.researchgate.net/figure>)

Το λογισμικό χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό αλγορίθμων για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα σε κάθε στάδιο επεξεργασίας. Οι περισσότεροι από αυτούς βασίζονται σε ήδη γνωστούς αλγόριθμους στο τομέα του computer vision αλλά έχουν και κάποιες παραλλαγές από την

εταιρία ώστε να βελτιστοποιείται το μοντέλο και να έχει και μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά δεν είναι γνωστός ο ακριβής συνδυασμός των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων και διαδικασιών που κάνει το πρόγραμμα καθώς αποτελεί ένα εμπορικό προϊόν.

Με βάση τις όσες πληροφορίες έχει δώσει η εταιρία Agisoft ανά διαστήματα, ο βασικός αλγόριθμος εντοπισμού κοινών σημείων στις φωτογραφίες είναι ο SIFT (scale-invariant feature transform) με κάποιες διαφοροποιήσεις προκειμένου να επιτυγχάνεται καλύτερη συνταύτιση. Ο προσδιορισμός των θέσεων της κάμερας στο χώρο επιτυγχάνεται με μια παραλλαγή του αλγόριθμου Bundler, ενώ η ανακατασκευή των επιφανειών γίνεται με μια προσέγγιση της μεθόδου Poisson.

Ένα πλεονέκτημα που προσφέρει το λογισμικό σε σχέση με αντίστοιχα είναι η αυτόματος εντοπισμός των markers μέσα στις φωτογραφίες. Αυτό επιτυγχάνεται μόνο με τους κωδικοποιημένους στόχους που παράγονται από το πρόγραμμα (εικόνα 1.14) και μπορούν να εκτυπωθούν και να τοποθετηθούν στο πεδίο. Με αυτό το τρόπο κάνει τη σκόπευση των φωτοσταθερών πιο γρήγορη και εύκολη και ταυτόχρονα πιο αποτελεσματική.



Εικόνα 1.14: Κωδικοποιημένος στόχος Photoscan

Το Photoscan κατά την επεξεργασία απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ γι' αυτό και πρέπει πριν την επεξεργασία να εξετάζεται αν ο συγκεκριμένος διαθέσιμος ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα. Στο πίνακα 1.1 παρουσιάζεται για κάθε δεδομένη ποιότητα ανακατασκευής επιφανειών πόση μνήμη RAM είναι απαραίτητη. Οι ποσότητες αυτές εξαρτώνται βέβαια και από τη πολυπλοκότητα του αντικείμενο το οποίο καλείται το πρόγραμμα να ανακατασκευάσει.

Photos	20 - 50	100	200	500
Lowest	100 MB - 300 MB	150 MB - 450 MB	300 MB - 1 GB	1 GB - 3 GB
Low	500 MB - 1.5 GB	750 MB - 2.2 GB	1.5 GB - 4.5 GB	4 GB - 12 GB
Medium	2 GB - 6 GB	3 GB - 9 GB	6 GB - 18 GB	15 GB - 45 GB
High	8 GB - 24 GB	12 GB - 36 GB	24 GB - 72 GB	60 GB - 180 GB
Ultra high	32 GB - 96 GB	48 GB - 144 GB	96 GB - 288 GB	240 GB - 720 GB

Πίνακας 1.1: Απαιτήσεις σε μνήμη Ram για κάθε ποιότητα ανακατασκευής (<http://www.agisoft.ru/w/index.php?title=PhotoScan>)

Τέλος, το PhotoScan , δίνει τη δυνατότητα να εξαχθεί το τελικό προϊόν σε διάφορες μορφές για περαιτέρω επεξεργασία σε τρίτο λογισμικό (AutoCAD, Sketch Up κ.α.). Παράλληλα παράγει αναφορά για όλη τη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων η οποία περιλαμβάνει λεπτομέρειες από τους χρόνους επεξεργασίας μέχρι τις ακρίβειες του μοντέλου και τιμές για διάφορες μεταβλητές.

1.7 Παραγωγή τριδιάστατου μοντέλου

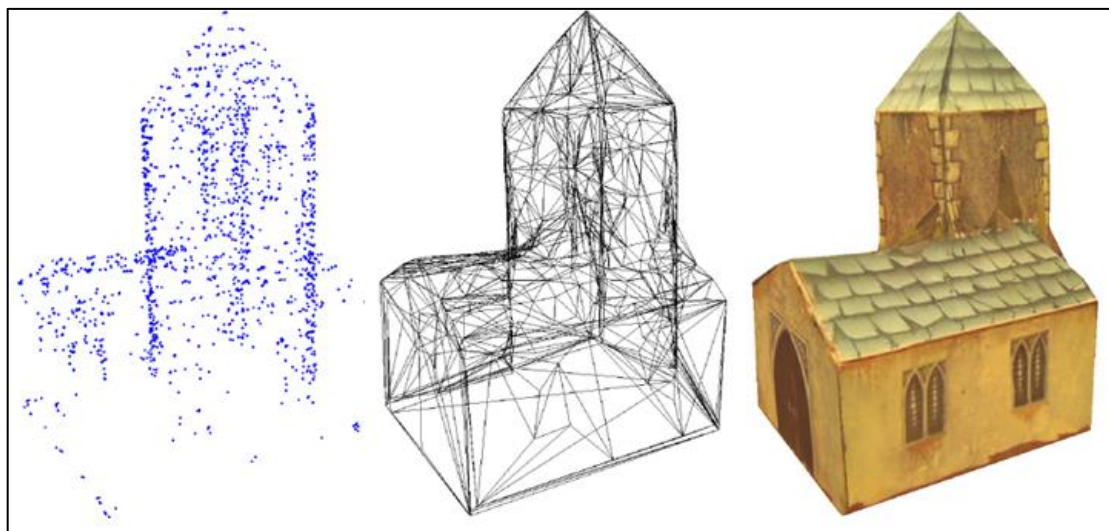
Ως τριδιάστατο μοντέλο νοείται ένα σύνολο επιφανειών με υφή και χρώμα, σωστά τοποθετημένο στο χώρο ώστε να τηρεί τη γεωμετρία του αρχικού αντικειμένου και να περιέχει όλη τη σημαντική λεπτομέρεια. Το τριδιάστατο μοντέλο μπορεί να προβληθεί και να εξεταστεί είτε ψηφιακά σε κατάλληλο λογισμικό είτε να εκτυπωθεί τριδιάστατα από ειδικούς εκτυπωτές.

Η παραγωγή του τελικού μοντέλου γίνεται από ειδικά και εξελιγμένα αποκλειστικά για τέτοιες εργασίες προγράμματα τα οποία παρόλο τις διαφορές τις οποίες μπορεί να έχουν βασίζονται όλα στις ίδιες αρχές και στη μέθοδο του SfM. Τα βήματα (εικόνα 1.15) που ακολουθούνται για την ανακατασκευή τριδιάστατου χώρου από δυσδιάστατες φωτογραφίες είναι τα εξής σειρά εκτέλεσης ταυτόσημη με τη σειρά αναγραφής:

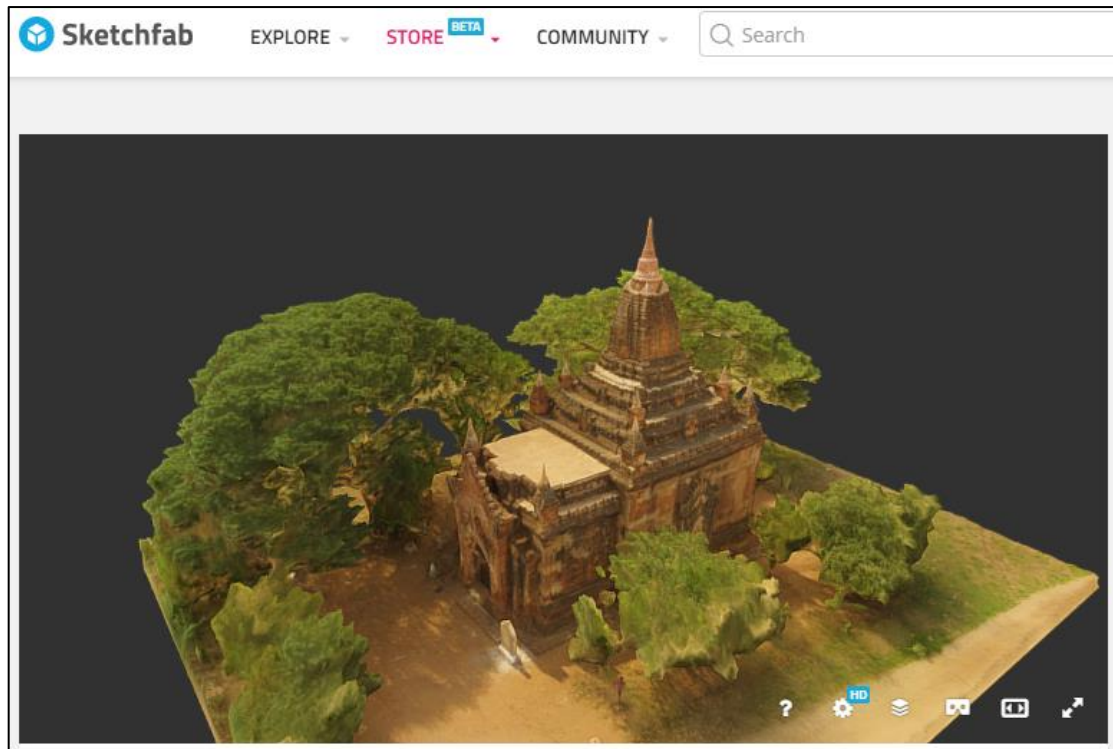
- 1) Συνταύτιση σημείων – Alignment: εντοπίζονται τα κοινά σημεία ανάμεσα τις φωτογραφίες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως σημεία σύνδεσης γι' αυτές και να αποκατασταθεί ο σχετικός προσανατολισμός. Δημιουργείται το αραιό νέφος σημείων (sparse cloud).
- 2) Γεωαναφορά – Georeference: γεωαναφέρεται το sparse cloud ώστε να αποκτήσει σωστή θέση, κλίμακα και προσανατολισμό. Στο στάδιο αυτό, το οποίο είναι και προαιρετικό, γίνεται η αποκατάσταση του απόλυτου προσανατολισμού και ταυτόχρονα η βελτιστοποίηση των καμερών στο χώρο.

- 3) Πύκνωση σημείων – Dense point cloud: εξάγεται όλη η διαθέσιμη πληροφορία από τις φωτογραφίες προκειμένου να πυκνωθεί το αραιό νέφος σημείων και να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή επιφανειών. Παράγεται το πυκνό νέφος σημείων (dense cloud).
- 4) Δημιουργία τριγώνων – Meshing: κατασκευάζονται μικρές επιφάνειες (τρίγωνα) ανάμεσα στα σημεία του dense cloud. Το παράγωγο είναι στην ουσία ένα μοντέλο του πραγματικού αντικειμένου.
- 5) Προσθήκη υφής – Texturing: προστίθεται η σωστή υφή στις ανακατασκευασμένες επιφάνειες ώστε να είναι το μοντέλο ρεαλιστικό και όμοιο με το πραγματικό αντικείμενο. Το παράγωγο του σταδίου είναι το τελικό τριδιάστατο μοντέλο.

Ένα τριδιάστατο μοντέλο μπορεί προβληθεί και παρουσιαστεί με διάφορους τρόπους. Αρχικά, μπορεί να προβληθεί στο λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να παραχθεί ή σε κάποιο τρίτο λογισμικό που υποστηρίζει τριδιάστατα αντικείμενα όπως το AutoCAD ή το MeshLab. Εάν δεν υπάρχει πρόσβαση σε κανένα τέτοιο λογισμικό μπορεί κάποιος να δει ένα τριδιάστατο μοντέλο σε ιστοσελίδες κατάλληλα διαμορφωμένες όπως είναι το Sketchfab (www.sketchfab.com). Η ιστοσελίδα αυτή, που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.16, είναι μια μεγάλη πλατφόρμα βασισμένη στο WebGL στην οποία δημοσιεύονται μοντέλα διαφόρων ειδών. [9]



Εικόνα 1.15: Sparse cloud, Mesh, 3D model



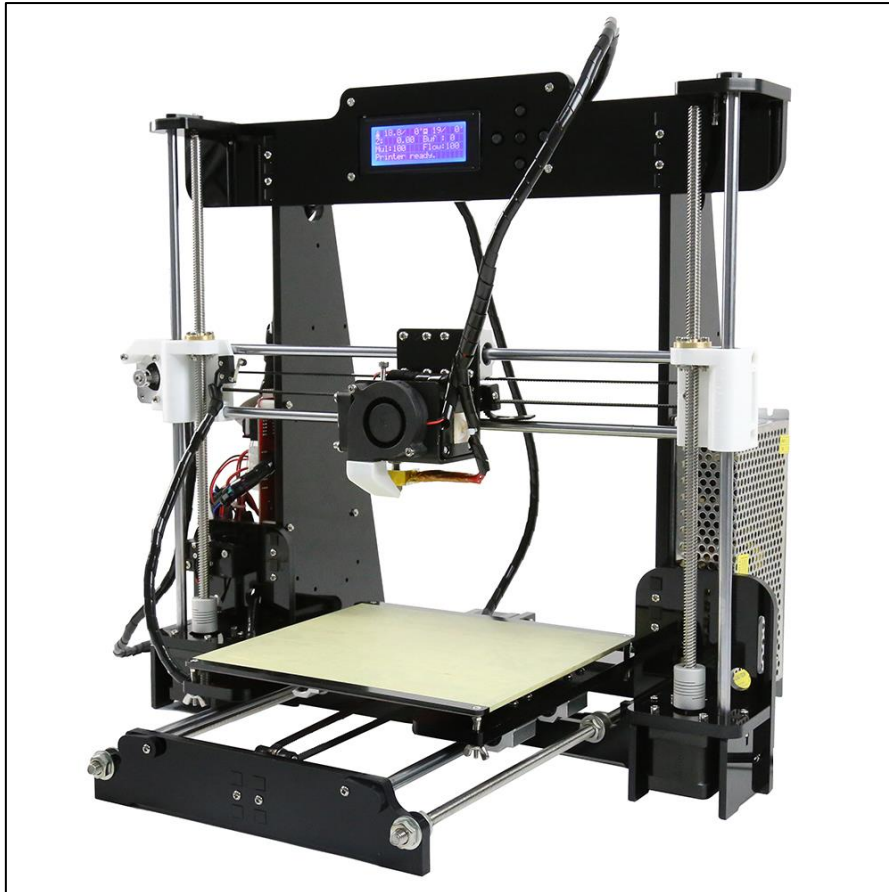
Εικόνα 1.16: Εφαρμογή Sketchfab για θέαση 3D μοντέλων

Φυσικά υπάρχει και η δυνατότητα, όπως και στα διδιάστατα τοπογραφικά διαγράμματα, να εκτυπωθεί το μοντέλο και να αποκτήσει φυσική υπόσταση.

Η εργασία αυτή εκτελείται από ειδικούς εκτυπωτές (3D printers) οι οποίοι λειτουργούν με εντελώς διαφορετική φιλοσοφία από τους παραδοσιακούς εκτυπωτές (εικόνα 1.17). Χρησιμοποιούν μικροσκοπικά σωληνάρια σαν ίνες από κάποιο υλικό (πολυουρεθάνη συνήθως) το οποίο υλικό αφού ζεσταθεί και λιώσει τοποθετείται τμηματικά σε επίπεδα από κάτω προς τα πάνω. Η διαδικασία εκτελείται με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια αφού ο εκτυπωτής διαθέτει ρομποτικό πιστόλι εναπόθεσης υλικού με 3 βαθμούς ελευθερίας και τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Τα εκτυπωμένα τριδιάστατα μοντέλα (εικόνα 1.18), ανάλογα και με τον εκτυπωτή, μπορεί να είναι πολύ υψηλής ακρίβειας και σύνθετης γεωμετρίας εμφανίζοντας ακόμα και την πιο μικροσκοπική λεπτομέρεια. Φυσικά η διαδικασία της εκτύπωσης με αυτά τα μηχανήματα είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και απαιτεί υπομονή και γνώση των δυνατοτήτων του εκτυπωτή για να εκτελεστεί σωστά. [Evans B., 2012]

Τέλος, είναι σημαντικό να υπολογίζονται οι διαστάσεις του μοντέλου προς εκτύπωση επιλέγοντας την επιθυμητή κλίμακα ούτως ώστε να γνωρίζει ο χρήστης αν μπορεί να εκτυπωθεί ολόκληρο το μοντέλο σε ένα στάδιο ή τμηματικά σε κομμάτια.



Εικόνα 1.17: Τριδιάστατος εκτυπωτής



Εικόνα 1.18: Εκτυπωμένο τριδιάστατο μοντέλο κτιρίου

1.8 Έλεγχος

Ο έλεγχος των παραγόμενων δεδομένων αποτελεί σημαντικό κομμάτι κάθε εφαρμογής που πραγματοποιεί ένας μηχανικός. Ωστόσο προκειμένου να εξακριβωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του τελικού προϊόντος πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος ορθότητας αυτού.

Ο έλεγχος του τελικού προϊόντος πραγματοποιείται ακολουθώντας τις ίδιες αρχές ελέγχου που ακολουθούνται και σε ένα τοπογραφικό διδιάστατο ή τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα. Στην περίπτωση του τριδιάστατου τοπογραφικού διαγράμματος, η διαδικασία του ελέγχου πραγματοποιείται με μέτρηση μηκών και πληρότητας του σχεδίου. Η διαδικασία εκτελείται στο πεδίο με εκτυπωμένα τμήματα του τριδιάστατου σχεδίου, είτε αυτά είναι προοπτικά, είτε προβολικά.

Αντίστοιχα στη περίπτωση του τριδιάστατου μοντέλου, θα πρέπει να γίνει έλεγχος μηκών, συντεταγμένων, ή ακόμα και υψής του τελικού παράγωγου. Πιο συγκεκριμένα δίνεται η δυνατότητα μέτρησης μηκών μέσω του λογισμικού επεξεργασίας, τα οποία μπορούν να μετρηθούν και στο ύπαιθρο με την χρήση μετροταινίας. Έτσι θα γίνουν τοπομετρικοί έλεγχοι κατά μήκος όλης της περιοχής.

Επιπλέον, στην περίπτωση που έχει προηγηθεί το στάδιο της γεωαναφοράς, μπορούν να αντληθούν οι συντεταγμένες ορισμένων σημείων από το λογισμικό σε συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Τα ίδια σημεία μπορούν να μετρηθούν και γεωδαιτικά και να υπολογιστούν οι συντεταγμένες τους στο ίδιο σύστημα προκειμένου να ελεγχθεί η θέση τους. Τα σημεία αυτά είναι αδύνατο να ταυτίζονται επομένως ο έλεγχος θα γίνει με την χρήση της παρακάτω ανισότητας για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. [Αγατζά-Μπαλοδήμου Α.,2009]

$$\Delta x \leq 1.96 \sigma_{\Delta x} \quad (1.13)$$

$$\text{με } \Delta x = |x_{(\text{φωτογρ.})} - x_{(\text{γεωδ.})}| \text{ και } \sigma_{\Delta x} = \sqrt{\sigma_{x_{(\text{γεωδ.})}}^2 + \sigma_{x_{(\text{φωτογρ.})}}^2}$$

Αν η διαφορά μεταξύ των δύο σημείων είναι μικρότερη από το σφάλμα της, τότε η διαφορά τους θεωρείται αμελητέα και συνεπώς το μοντέλο θεωρείται ορθό. Ως σφάλμα $\sigma_{\Delta x}$ θα θεωρηθεί το σφάλμα όπως προκύπτει από το μέγιστο σφάλμα συντεταγμένων γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά με βάση την γεωαναφορά του μοντέλου. Ο ίδιος έλεγχος θα χρησιμοποιηθεί και για τις άλλες δύο μεταβλητές Y και H.

Επιπλέον, θα γίνει έλεγχος και με τη χρήση του παραγόμενου ορθοφωτοχάρτη που θα δώσει και ένα πιο τεκμηριωμένο συμπέρασμα. Στη

περίπτωση αυτή είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια από αυτή του μεγέθους της εδαφοψηφίδας (GSD – Ground Sampling Distance). Συνήθως επιτυγχάνεται μια ακρίβεια 1-2 φορές μεγαλύτερη του GSD οριζοντιογραφικά κατά X,Y και 3 φορές μεγαλύτερη υψομετρικά κατά H.

Τέλος θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της υφής του μοντέλου όπως αυτή δημιουργήθηκε από το λογισμικό καθώς θα εξεταστεί η ρεαλιστική απεικόνιση του τελικό προϊόντος με το πραγματικό.

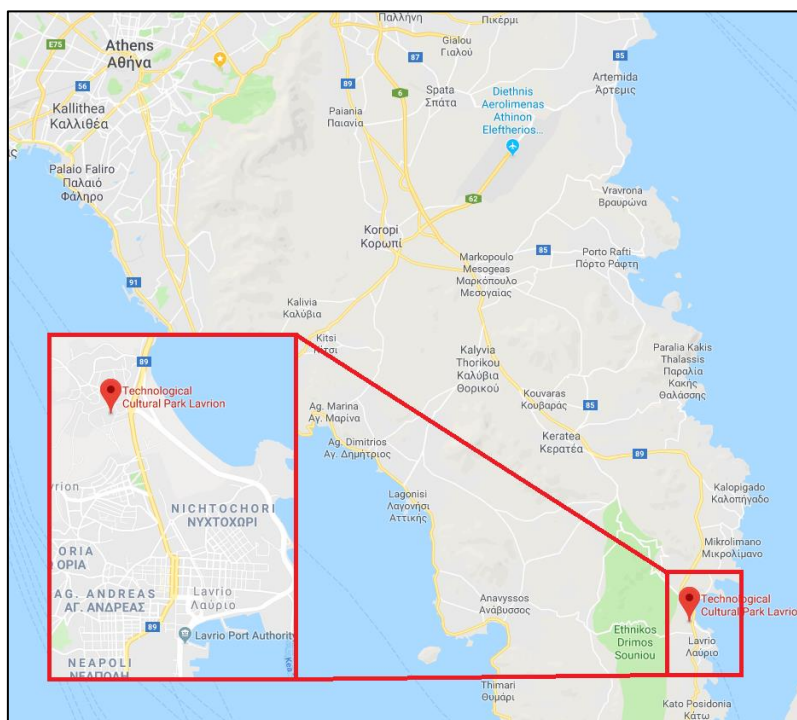
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1 Περιοχή μελέτης

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε το Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ) έξω από την ομώνυμη πόλη. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε για τρεις λόγους. Αρχικά, γιατί είχε πραγματοποιηθεί αποτύπωση της ευρύτερης περιοχής και του πάρκου με αποτέλεσμα να υπάρχει υλοποιημένο οριζοντιογραφικό δίκτυο και τοπογραφικά διαγράμματα. Επιπλέον σημαντικό ρόλο αποτέλεσε το ότι πρόκειται για μία έκταση με ανοιχτό ορίζοντα και αραιή δόμηση, προϋποθέσεις απαραίτητες για την πτήση του συστήματος μη επανδρωμένου αεροσκάφους (ΣμηΕΑ-drone/UAV) και τη παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου.

Τέλος, το ΤΠΠΛ ανήκει στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με αποτέλεσμα η διαδικασία της τριδιάστατης αποτύπωσης και της πτήσης του drone να γίνει χωρίς κάποια ιδιαίτερη δυσκολία ή άδεια.

Το ΤΠΠΛ βρίσκεται 67 χιλιόμετρα έξω από την πόλη της Αθήνας και μόνο 1.5 έξω από την πόλη του Λαυρίου. Είναι εύκολα προσβάσιμο τόσο με αυτοκίνητο όσο και με υπεραστικό ΚΤΕΛ και η είσοδος του βρίσκεται πάνω σε κυκλικό κόμβο.



Εικόνα 2.1: Τοποθεσία ΤΠΠΛ

Πρόκειται για μια έκταση 60 στρεμμάτων με πληθώρα ανακαινισμένων αιθουσών, κάποιες από τις οποίες χρησιμοποιούνται σαν γραφεία από το ΕΜΠ και άλλες ως αίθουσες εκδηλώσεων οι οποίες έχουν στεγάσει από συνέδρια μέχρι εκπομπές της Ελληνικής τηλεόρασης. Στην εικόνα 2.2 φαίνεται η κάτοψη της ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 2.2: Κάτοψη του ΤΠΠΑ

Η τοποθεσία του αποτελούσε από τα αρχαία κιόλας χρόνια σημαντικό πόλο ανάπτυξης και οικονομίας. Τα μεταλλεία Λαυρίου είναι από τα αρχαιότερα στον Ελλαδικό χώρο τα οποία παρουσιάζουν δραστηριότητα από το 3000 π.Χ. με την συστηματική εκμετάλλευσή τους να ξεκινάει την εποχή της Αθηναϊκής Δημοκρατίας το 508 π.Χ.. Παρέμειναν σε αδράνεια από το 2^ο αιώνα π.Χ. έως και τον 19^ο αιώνα μ.Χ. όπου και η μεταλλουργία στην περιοχή άνθισε και δημιούργησε έναν λειτουργικό κοινωνικοοικονομικό πόλο που διατηρήθηκε για πάνω από εκατό χρόνια (1867-1989) στην περιοχή της Λαυρεωτικής.

Κατά την βιομηχανική κρίση, τις δεκαετίες του '70 και '80, η μεταλλουργική δραστηριότητα της περιοχής υπέστη σοβαρό πλήγμα αναγκάζοντας την τότε «Γαλλική Εταιρεία Μεταλλείων Λαυρίου» (ΓΕΜΛ) να διακόψει τις δραστηριότητες της το 1977.

Για τα επόμενα δώδεκα χρόνια (1977-1989) λάμβανε χώρα μια ανοιχτή συζήτηση με σκοπό την αναζήτηση δραστηριοτήτων οι οποίες θα μπορούσαν να δώσουν ζωή στις εγκαταστάσεις του συγκροτήματος της ΓΕΜΛ. Μια από τις προτάσεις που είχαν γίνει περιελάμβανε τη διατήρηση και αναγέννηση του παλαιού βιομηχανικού συγκροτήματος και την επανάχρησή του ως τεχνολογικό και πολιτιστικό πάρκο ώστε να διασωθεί η τεχνολογική φυσιογνωμία και ιστορία του χώρου.

Έτσι, το 1994 το εργοστάσιο της ΓΕΜΛ αγοράστηκε από το Υπουργείο Πολιτισμού, κηρύχθηκε διατηρητέο μνημείο και παραχωρήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο το οποίο υιοθέτησε το εγχείρημα με μεγάλο ενθουσιασμό ιδρύοντας το Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. [5]

Η εφαρμογή της διπλωματικής εργασίας θα γίνει σε ένα κτιριακό συγκρότημα αποτελούμενο από εννέα κτίσματα. Θα πραγματοποιηθούν κατάλληλες λήψεις για την δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου και θα γίνει σύγκριση αυτού με τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα του ίδιου συγκροτήματος. Παράλληλα όμως θα γίνει και εξαγωγή συντεταγμένων σημείων τα οποία δεν ήταν δυνατό να αποτυπωθούν με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους. Τα σημεία αυτά θα συμπληρωθούν στο διάγραμμα προκειμένου να είναι πλήρες.

2.2 Εξοπλισμός

Γενικά η πτήση ενός drone δεν απαιτεί την ίδια προετοιμασία που μπορεί να χρειαστεί μια γεωδαιτική αποτύπωση, όπως καταγραφή και συγκέντρωση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ο βασικός εξοπλισμός για τη πτήση είναι το μη επανδρωμένο όχημα αυτό καθ' εαυτό, τα παρελκόμενα του (μπαταρίες, χειριστήριο) καθώς επίσης και ένα tablet ώστε να καθοριστούν οι βασικές παράμετροι της πτήσης και να υπάρχει έλεγχος καθ' όλη τη διάρκεια αυτής.

Παρόλα αυτά είναι βασικό και πολύ σημαντικό, πριν από τον οποιοδήποτε σχεδιασμό και προετοιμασία, να ελεγχθεί η δυνατότητα πτήσης του drone στην περιοχή που καλείται ο χειριστής του οχήματος να δουλέψει.

Για τις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό τετρακόπτερο της εταιρίας DJI. Πρόκειται για το DJI Phantom 4 Pro, το πιο πρόσφατο της σειράς Phantom, το οποίο διαθέτει 4 αποσπώμενους έλικες και τιμή λιανικής πώλησης τα 1700 ευρώ. [3],[8]

Χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς επαγγελματίες για την παραγωγή τριδιάστατων μοντέλων και ορθοφωτοχαρτών. Αυτό γιατί είναι πιο φθινό από αντίστοιχα drone άλλων εταιριών προσφέροντας όμως πολύ καλά ή και καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά. Είναι μικρό, ανθεκτικό, διαθέτει

συστήματα αποφυγής εμποδίων ενώ η νέα του έκδοση (DJI Phantom 4 Pro V2.0 2018) είναι κατά 60% πιο ήσυχη κατά την πτήση και εξοπλισμένη με νέο σύστημα μετάδοσης εικόνας για καλύτερη εποπτεία.



Εικόνα 2.3: DJI Phantom 4 Pro

Μικτό βάρος	1388 g
Διαγώνιος (χωρίς τους έλικες)	350 mm
Χωρητικότητα μπαταρίας	5870 mAh
Χρόνος πτήσης	28 min
Μέγιστη ταχύτητα πτήσης	72 km/h
Μέγιστη εμβέλεια ελέγχου	7 km
Κάμερα	20 megapixels
Εστιακή απόσταση	8.8 mm
Σταθεροποιητής κάμερας	3 άξονες (yaw, pitch, roll)

Πίνακας 2.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Phantom 4 Pro

Όσον αφορά το γεωδαιτικό εξοπλισμό χρειάστηκαν δυο δορυφορικοί δέκτες GNSS με ακρίβεια κατά τη διαδικασία του RTK 8 mm + 1 ppm οριζοντιογραφικά και 15 mm + 1 ppm υψομετρικά, ένα modem και ένα πομποδέκτη για την ασύρματη ζεύξη των δύο δεκτών, ένας τρίποδας και ένας στυλαιός με σταθερό ύψος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ίσως είναι αναγκαία και η χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού (Total Station) με ικανότητα μέτρησης μηκών και χωρίς ανακλαστήρα (EDM) ώστε να μετρηθούν σημεία ενδιαφέροντος πάνω σε κάθετες επιφάνειες (τοίχοι κτιρίων) για χρήση ως φωτοσταθερά. Στο ΤΠΠΑ λόγω της τριδιάστατης γεωδαιτικής αποτύπωσης που είχε προηγηθεί υπήρχε πληθώρα τέτοιων σημείων με γνωστές συντεταγμένες η ακρίβεια των οποίων ήταν ίση ή και καλύτερη από αυτά που είχαν μετρηθεί με το RTK. Σκοπός αυτών των σημείων είναι να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά για την γεωαναφορά των φωτογραφικών λήψεων υπό γωνία.

2.3 Σήμανση και μέτρηση φωτοσταθερών

Σκοπός της σήμανσης φωτοσταθερών πάνω στη φυσική γήινη επιφάνεια είναι να μπορεί να γεωαναφερθεί το τριδιάστατο μοντέλο προκειμένου να αποκτήσει σωστή κλίμακα, προσανατολισμό και θέση σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Τα φωτοσταθερά επομένως δίνουν τη δυνατότητα να γίνει η επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού και να μεταφερθεί το μοντέλο από ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς σε κάποιο άλλο με γεωδαιτικές συντεταγμένες.

Επιλέχθηκε η ίδρυση 17 φωτοσταθερών σημείων (F1-F17) με συντεταγμένες στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς του 1987 (ΕΓΣΑ'87). Οι συντεταγμένες τους αποκτήθηκαν κάνοντας χρήση ενός δορυφορικού δέκτη GNSS μόνιμα τοποθετημένου σε σημείο γνωστών συντεταγμένων (Base) και ενός δεύτερου κινητού δέκτη (Rover) μέσω τεχνικής RTK (Real-Time Kinematic).

Η τεχνική του RTK είναι η ακριβέστερη μέθοδος αποτύπωσης χρησιμοποιώντας τα συστήματα GNSS σε πραγματικό χρόνο και είναι επίσης η μοναδική μέθοδος της δορυφορικής γεωδαισίας που μπορεί να δώσει τόσο ακριβή αποτελέσματα. Η ακρίβεια της μετρούμενης βάσης εκτιμάται ότι είναι $\pm 1 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$ και ο συνήθης χρόνος μετρήσεων είναι 10 – 30 sec. [Καλημέρης Γ., 2016]

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι και αρκετά ακριβή και απαιτείται ελάχιστος χρόνος για την πραγμάτωσή τους. Στοιχεία σημαντικά για την περάτωση της διαδικασίας αφού το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στις λήψεις από ψηλά σπάνια είναι μικρότερο από 2 cm/pixel με αποτέλεσμα η ακρίβεια του RTK να είναι επαρκής και ικανοποιητική, ενώ ταυτόχρονα εξοικονομείται χρόνος. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι ο αριθμός των φωτοσταθερών είναι μεγάλος και μοιρασμένος σε όλη την έκταση του πάρκου αλλά και έξω από αυτό.

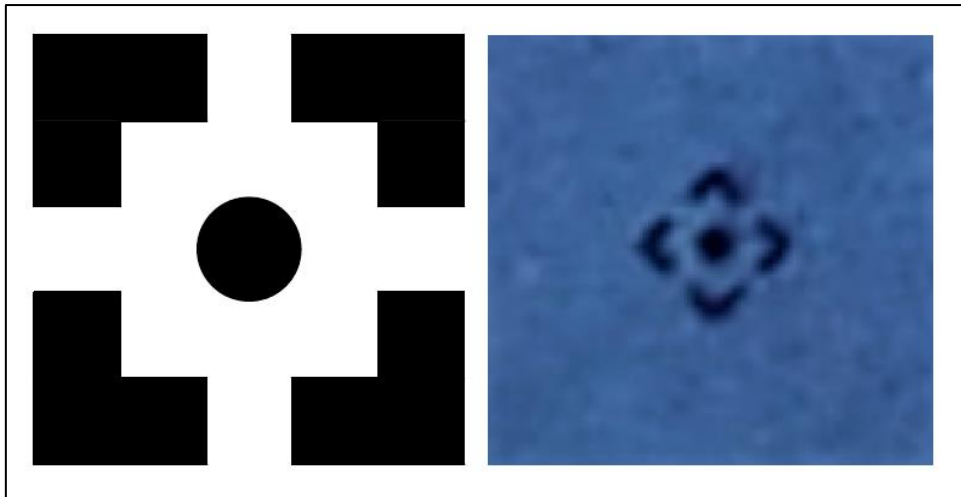
Για τη μόνιμη σήμανση των φωτοσταθερών στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε μία ξύλινη ιδιοκατασκευή τετραγωνικής διατομής προκειμένου να διατηρείται σταθερό το μέγεθος και το σχήμα τους αλλά και να ξεχωρίζει αισθητά από άλλες λεπτομέρειες τις επιφάνειάς (εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Ξύλινη ιδιοκατασκευή για σήμανση φωτοσταθερών

α/α	X	Y	H
F1	504326.445	4174973.393	4.381
F2	504301.392	4175045.552	9.666
F3	504248.287	4175028.080	11.172
F4	504137.033	4174980.552	11.550
F5	504186.986	4174897.027	7.243
F6	504256.445	4174850.237	6.735
F7	504294.815	4174918.208	4.817
F8	504419.012	4174938.907	2.763
F9	504448.968	4175003.753	3.201
F10	504438.067	4175107.373	2.283
F11	504442.877	4175107.980	2.060
F12	504374.360	4175137.058	6.363
F13	504207.598	4175143.576	14.673
F14	504241.270	4175097.084	12.727
F15	504404.485	4175022.507	2.884
F16	504286.938	4174979.364	4.529
F17	504265.012	4174908.314	4.366

Πίνακας 2.2: Συντεταγμένες φωτοσταθερών στο ΕΓΣΑ'87



Εικόνα 2.5: Σχήμα (αριστερά) και φωτοσταθερό πάνω στο έδαφος (δεξιά)

Οι τοποθέτηση των φωτοσταθερών έγινε με γνώμονα την ομοιόμορφη κατανομή τους σε όλη την έκταση ενδιαφέροντος αλλά και έξω από αυτή.

Έτσι, τοποθετήθηκαν 17 φωτοσταθερά, 8 έξω από το χώρο του πάρκου εκ των οποίων ένα αποτελεί γωνία φρεατίου ομβρίων και 9 μέσα, 3 εξ' αυτών να αποτελούν γωνία φρεατίου. Οι θέσεις τους παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Κατανομή Φωτοσταθερών στην περιοχή μελέτης

Στη συνέχεια πρέπει να εντοπιστούν και να μετρηθούν θέσεις πάνω στις επιφάνειες των κτιρίων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως τοποσταθερά σημεία του μοντέλου. Όπως σημειώθηκε και παραπάνω τα σημεία εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν ως τοποσταθερά πάνω στις επιφάνειες των κτιρίων είχαν ήδη μετρηθεί κατά τη διάρκεια της τριδιάστατης αποτύπωσης στο χώρο του ΤΠΠΑ. Ως εκ τούτου δεν ήταν αναγκαία η χρήση του Total Station στη διαδικασία εκείνης της μέρας, την ημέρας πτήσης.

Είθισται σε τέτοιες κατακόρυφες επιφάνειες, όπως αυτές των τοίχων, να τοποθετούνται αυτοκόλλητα-στόχοι τα οποία μετριοούνται με Total Station κάνοντας χρήση της δυνατότητας μέτρησης με laser (EDM) αντί για ανακλαστήρα .

Στην περίπτωση αυτής της διπλωματικής δεν κρίθηκε απαραίτητη η τοποθέτηση και η εκ νέου μέτρηση φωτοσταθερών στα κτίρια με μικρούς στόχους αφού υπήρχε ήδη διαθέσιμη πληροφορία για λεπτομέρειες των επιφανειών. Παρόλα αυτά η επιλογή των σημείων εκείνων, πάνω στα κτίρια, που θα χρησιμοποιηθούν κατά την επίλυση του απόλυτου προσανατολισμού και την δημιουργία του μοντέλου δεν είναι τυχαία, ενώ παράλληλα η επιλογή τους είναι και ιδιαίτερα δύσκολη λόγω και της φύσης της διαδικασίας.

Οι θέσεις των τοποσταθερών θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να ξεχωρίζουν εύκολα σε μία φωτογραφία. Τα φωτοσταθερά εδάφους και τα αυτοκόλλητα φωτοσταθερά που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν σταθερή γεωμετρία, ενώ οι συντεταγμένες τους δίνονται στο κέντρο τους με αποτέλεσμα να είναι εύκολη η στόχευση τους στο λογισμικό επεξεργασίας. Αντιθέτως οι λεπτομέρειες εκείνες κτιρίων που θα χρησιμοποιηθούν για τη γεωαναφορά θα πρέπει να είναι τέτοιες οι οποίες να ξεχωρίζουν έντονα ακόμα και με γυμνό μάτι.

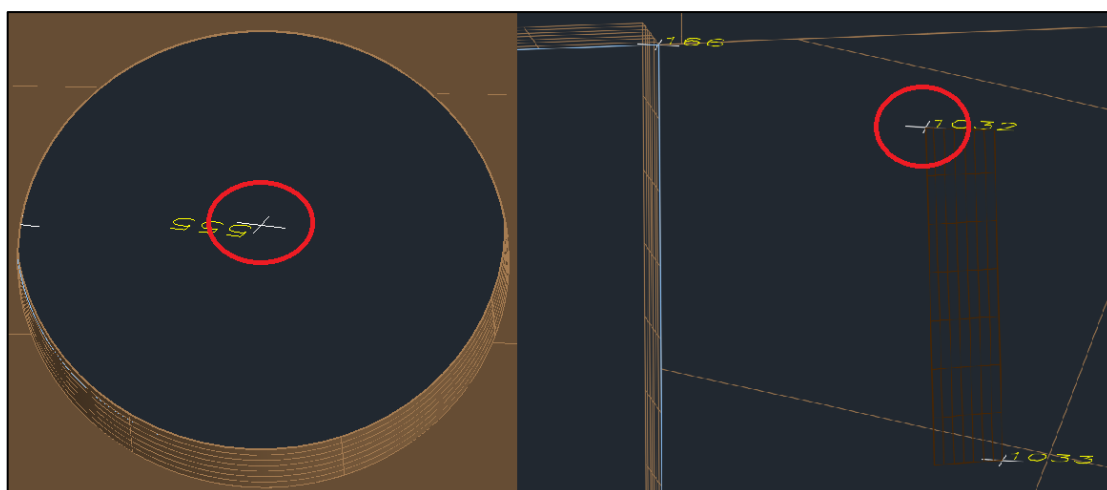
Ζητούμενο λοιπόν είναι να βρεθούν θέσεις πάνω στις επιφάνειες των τοίχων με έντονη χρωματική αντίθεση, συγκεκριμένη γεωμετρία και να είναι σχετικά επίπεδες. Τέτοια σημεία είναι αυτά στις γωνίες των παραθύρων, το κέντρο ενός φωταγωγού, ακόμα και μια λεπτομέρεια της εξωτερικής επένδυσης ενός κτίσματος η οποία είναι εύκολα διακριτή.

Οι συντεταγμένες αυτών των σημείων στο ΕΓΣΑ'87 αντλήθηκαν από το τριδιάστατο σχέδιο που είχε προηγηθεί της όλης διαδικασίας αυτής. Γι' αυτό το λόγω δε χρειάστηκε και κάποιο αυτοσχέδιο κροκί υπαίθρου για την καταγραφή των θέσεων που επιλέχθηκαν.

Στις εικόνες 2.7 και 2.8 φαίνονται κάποιες από τις θέσεις που επιλέχθηκαν στην φυσική επιφάνεια και οι αντίστοιχες αυτές θέσεις στο τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα.



Εικόνα 2.7: Κατάλληλες θέσεις για χρήση ως τοποσταθερά



Εικόνα 2.8: Αντίστοιχες θέσεις της εικόνας 2.7 στο ψηφιακό διάγραμμα

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι επειδή ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία, η χρήση δηλαδή θέσεων που αποτελούν λεπτομέρειες των κτιρίων, έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο που ακριβώς μετρήθηκαν τα σημεία με το Total Station. Λόγω του ότι αυτές οι πλάγιες λήψεις γίνονται σε σχετικά μικρή απόσταση από το σημείο ενδιαφέροντος, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι αρκετά μικρότερο (<2 cm/pixel) από αυτό στις λήψεις από ψηλά. Ως εκ τούτου, από τη στιγμή που δεν πρόκειται για ειδικά φτιαγμένους αυτοκόλλητους στόχους, πρέπει η στόχευση τους στο λογισμικό επεξεργασίας να γίνει με μεγάλη προσοχή και σιγουριά ώστε να υπάρχει το καλύτερο δυνατό και πιο ακριβές αποτέλεσμα.

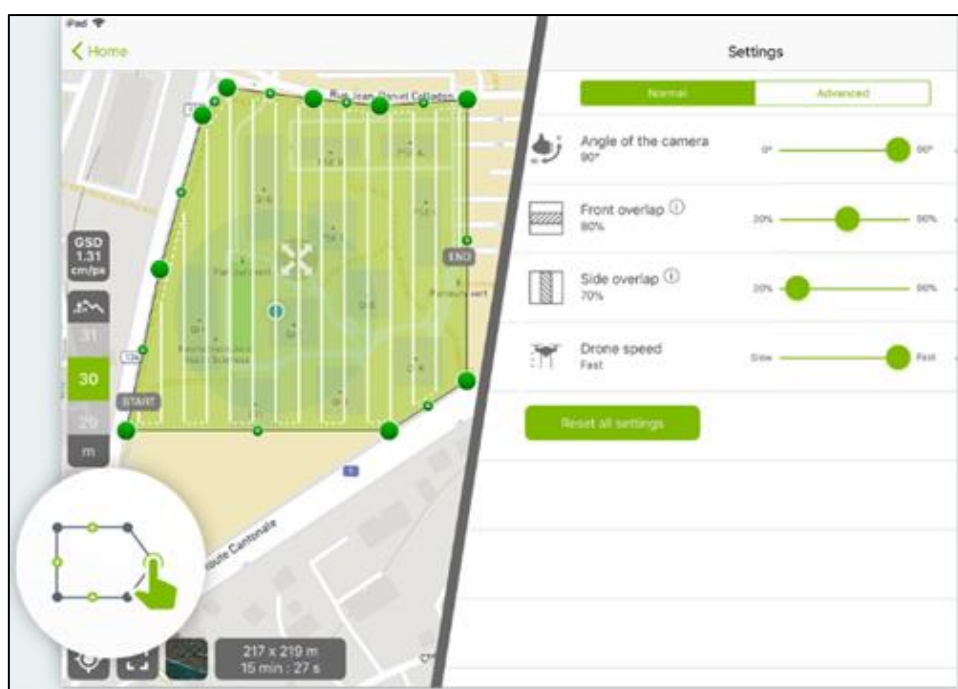
Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας (GSD) στην εφαρμογή που έγινε κυμαίνεται από 3-13 mm κι αυτό γιατί στις λήψεις που έγιναν η απόσταση από το αντικείμενο ενδιαφέροντος διαφοροποιούνταν αρκετά. Ο μέσος όρος που υπολογίζεται από το πρόγραμμα να είναι στα 8.41 mm/pixel.

2.4 Προγραμματισμός και διαδικασία πτήσης

Ο προγραμματισμός πτήσης ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα βήματα γενικά στα οποία καθορίζονται βασικές παράμετροι αναγκαίοι για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά, διαθέτοντας κατάλληλο εξοπλισμό και λογισμικό πτήσης η διαδικασία απλοποιείται αρκετά και δεν ακολουθεί τα ίδια βήματα όπως σε αεροφωτογραφίες του παρελθόντος.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα λογισμικά προγραμματισμού πτήσης είναι το Pix4D Capture της Pix4D S.A. Κυκλοφορεί τόσο για πλατφόρμες Android όσο και για iOS (εικόνα 2.9) και η διανομή της εφαρμογής γίνεται δωρεάν. Το πρόγραμμα είναι πολύ απλό στη χρήση του και παρέχει μεγάλη διευκόλυνση στο χειριστή καθώς διαθέτει μια λίστα από drones συμβατά με το λογισμικό. Το τελευταίο σημαίνει ότι διαθέτει μία βάση δεδομένων από την οποία αντλεί τα χαρακτηριστικά του επιθυμητού UAV, όπως μέγεθος αισθητήρα και ανάλυση της κάμερας, εστιακή απόσταση, καθώς και άλλα απαραίτητα για το λογισμικό δεδομένα.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το DJI Phantom 4 Pro, το οποίο είναι συμβατό με το λογισμικό, το μόνο που απομένει για το χρήστη είναι να καταχωρήσει την έκταση προς φωτογράφιση, την γωνία των λήψεων, τις επιθυμητές επικαλύψεις και το υψόμετρο της πτήσης. Υπάρχει και η δυνατότητα περαιτέρω παραμετροποίησης αλλά δεν κρίθηκε αναγκαία στη παρούσα φάση. [Αδαμόπουλος Ε., 2015]



Εικόνα 2.9: Λογισμικό πτήσης Pix4D Capture

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής έγιναν πολλαπλές πτήσεις τόσο για τις ναδρικές λήψεις όσο και για τις πλάγιες (κάμερα υπό κλίση) ώστε να υπάρχει όλη η πληροφορία του πάρκου διαθέσιμη για την παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου.

Ωστόσο οι πολλαπλές λήψεις πραγματοποιήθηκαν γιατί παράλληλα την ημέρα της πτήσης, 13 Δεκεμβρίου του 2017, ο αέρας ήταν αρκετά δυνατός με αποτέλεσμα να υπάρχει φόβος αλλοίωσης του αποτελέσματος στις φωτογραφίες από τις δυνατές ριπές του αέρα.

Οι πτήσεις που έγιναν παρουσιάζονται παρακάτω με χρονική σειρά και με όλες τις παραμέτρους που καθορίστηκαν γι' αυτές:

- Η πρώτη πτήση για τις ναδρικές λήψεις με κατεύθυνση ΝΑ-ΒΔ σε υψόμετρο 90 μέτρων με επικάλυψη 85% κατά μήκος και 60% κατά πλάτος. Ο χρόνος πτήσης ήταν 14 λεπτά, η ταχύτητα είχε οριστεί στα 7 m/s (25 km/h) και κατά τη διάρκεια της πτήσης ελήφθησαν 204 φωτογραφίες.
- Η πτήση για τις πλάγιες λήψεις. Σε αυτό το στάδιο δεν γίνεται κάποιος προγραμματισμός στο λογισμικό πτήσης. Η όλη διαδικασία γίνεται χειροκίνητα και το λογισμικό χρησιμοποιείται μόνο για την εποπτεία και την εξέλιξη αυτής. Οι συγκεκριμένες λήψεις έγιναν υπό γωνία, αλλά όχι προκαθορισμένη (<45°) καθώς υπήρχαν περιορισμοί στο χώρο του πάρκου λόγω των στενών δρόμων από τη μια μεριά. Επιπλέον σε αυτό το στάδιο δεν γίνεται να καθοριστεί κάποια πλάγια επικάλυψη με αποτέλεσμα η επιτυχία της πτήσης να επαφίεται αποκλειστικά και μόνο στην εμπειρία του χειριστή. Κατά τη διάρκεια αυτής της πτήσης ελήφθησαν 251 φωτογραφίες.
- Ακολούθησε μια κυκλική πτήση στα 50 m με την κάμερα σε γωνία 45° στην οποία ελήφθησαν 43 φωτογραφίες. Σε τέτοιου είδους πτήση δεν γίνεται να γίνουν λήψεις με συγκεκριμένη κατά πλάτος επικάλυψη αφού η όλη διαδικασία γίνεται χειροκίνητα.
- Τέλος, έγινε μια τελευταία πτήση προκειμένου να αποκτηθούν επιπλέον ναδρικές λήψεις με κατεύθυνση ΝΔ-ΒΑ. Η πτήση πραγματοποιήθηκε με τις ίδιες παραμέτρους της προηγούμενης είχε διάρκεια 14 λεπτών και ελήφθησαν 195 φωτογραφίες.

Ολόκληρη η διαδικασία της πτήσης διήρκησε περίπου 50 λεπτά στον οποίο χρόνο ελήφθησαν συνολικά 693 φωτογραφίες, 399 ναδρικές και 294 πλάγιες, ανάλυσης 5472x3648 pixel.

Η έκταση που φωτογραφήθηκε ήταν περίπου 140 στρέμματα και η μεγαλύτερη ακμή πορείας πτήσης έφτασε τα 400 μέτρα.

2.5 Νομικό πλαίσιο

Όπως και στις χώρες του εξωτερικού, έτσι και στην Ελλάδα, η αυξανόμενη κατοχή και χρήση των drone οδήγησε την κυβέρνηση να τα θέσει κάτω από κάποιο νομικό πλαίσιο τόσο για τις επιτρεπόμενες περιοχές πτήσης όσο και για την άδεια κατοχής και πτήσης από τον χειριστή.

Η απόφαση υπ' αριθμόν Δ2/Δ/352/17475 (ΦΕΚ Β'9/13-1-2010) που τέθηκε σε ισχύ το 2010 θέτει κάποιους γενικούς κανονισμούς για την χρήση των αερομοντέλων. Ορίζει ως αερομοντέλο μία ιπτάμενη συσκευή περιορισμένων διαστάσεων, που φέρει ή όχι προωθητικό σύστημα, που δεν έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο χρησιμοποιείται για αεραθλητισμό ή ψυχαγωγία. Τα αερομοντέλα αυτά μπορεί να είναι τηλεχειριζόμενα, ελεύθερης πτήσης, ή κυκλικής πτήσης. Θέτει συγκεκριμένους περιορισμούς για αυτά, όπως τη μέγιστη επιφάνεια των πτερυγίων, ο μέγιστος κυβισμός, και το μέγιστο φορτίο ανά κινητήρα. Απαγορεύει τη ρίψη οποιουδήποτε αντικειμένου κατά τη διάρκεια της πτήσης και την προσάρτηση πρόσθετου φορτίου που μπορεί να μετακινηθεί ή να αποσπαστεί από το μοντέλο. Ακόμη στην απόφαση αυτή αναφέρεται, ότι οι πτήσεις θα πρέπει να είναι περιορισμένες στον εναέριο χώρο που προσφέρεται για τον σκοπό αυτό και σε απόσταση ασφαλείας 50 μέτρων από ανθρώπους, ενώ οι απογειώσεις και προσγειώσεις θα εκτελούνται σε χώρους ελεύθερους εμποδίων.

Δεν επιτρέπονται πτήσεις αερομοντέλων χωρίς άδεια:

- σε απαγορευμένες, περιορισμένες, επικίνδυνες και δεσμευμένες περιοχές όπως αυτές αναφέρονται στις πάσης φύσεως αεροναυτικές εκδόσεις της ΥΠΑ (Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας)
- σε ύψος μεγαλύτερο των 122 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους
- σε απόσταση μικρότερη των 3 χιλιομέτρων από ελεγχόμενο αεροδρόμιο
- εντός πολιτικών ή στρατιωτικών αεροδρομίων
- άνωθεν, πλησίον ή εντός στρατιωτικών εγκαταστάσεων
- άνωθεν ή πλησίον κατοικημένων περιοχών
- άνωθεν ή πλησίον εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας
- άνωθεν ή πλησίον αρχαιολογικών χώρων, εκτός αν παρέχεται σχετική άδεια από την υπεύθυνη υπηρεσία

Σύμφωνα με την συγκεκριμένη απόφαση, UAV είναι μία ιπτάμενη συσκευή που δεν μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο έχει αναπτυχθεί και

χρησιμοποιείται για επιστημονικούς, ερευνητικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς. Τα UAV δεν θεωρούνται αερομοντέλα, και τα αερομοντέλα δεν θεωρούνται UAV. Δηλαδή, ο ίδιος κανονισμός που περιόριζε την χρήση τους, τα εξαιρούσε κατά κάποιον τρόπο από αυτές τις διατάξεις αφού UAV και αερομοντέλα εμπίπταν σε διαφορετικές κατηγορίες.

Όμως μετά την 1^η Ιανουαρίου του 2017 εφαρμόζεται το ΦΕΚ-B-3152/30.9.2016, που τα διαχωρίζει σε σχέση με τα αερομοντέλα, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε επιπλέον κανόνες. Πιο συγκεκριμένα:

Τα ΣμηΕΑ κατατάσσονται σε κατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια:

- τη μέγιστη μάζα απογείωσης (MTOM)
- το είδος της χρήσης
- το ύψος από την επιφάνεια της γης ή της θάλασσας όπου επιτρέπεται να πετούν
- τις περιοχές (αποκλειστικές ή μη) όπου πετούν
- τις τεχνικές τους δυνατότητες
- την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος πτητικής λειτουργίας τους

Με τα προηγούμενα κριτήρια καθορίζονται οι ακόλουθες 3 κύριες κατηγορίες ΣμηΕΑ:

1. Η «Ανοικτή» κατηγορία (UAS Open Category)
2. Η «Ειδική» κατηγορία (UAS Specific Category)
3. Η «Πιστοποιημένη» κατηγορία (UAS Certified Category)

Η «Ανοικτή» κατηγορία ΣμηΕΑ διακρίνεται σε τρεις υποκατηγορίες:

- A0: «Μίνι Συστήματα Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με μέγιστη μάζα αεροσκάφους κατά την απογείωση (MTOM) μικρότερη του ενός κιλού (<1 kg).
- A1: «Πολύ Μικρά Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με μέγιστη μάζα αεροσκάφους κατά την απογείωση (MTOM) ίση ή μεγαλύτερη από ένα κιλό (≥ 1 kg) έως τα τέσσερα κιλά (<4 kg).
- A2: «Μικρά Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών» με μέγιστη μάζα αεροσκάφους κατά την απογείωση (MTOM) ίση ή μεγαλύτερη από τα τέσσερα κιλά (≥ 4 kg) και έως τα είκοσι πέντε κιλά (<25 kg).

Για τα ΣμηΕΑ προβλέπονται οι παρακάτω άδειες και πιστοποιητικά :

- Απαιτείται άδεια χειριστή ΣμηΕΑ για:
 - Τις υποκατηγορίες A0 & A1 της «Ανοικτής» κατηγορίας (μόνο επαγγελματική χρήση).
 - Την A2 της «Ανοικτής» (για όλες τις χρήσεις – ερασιτεχνική & επαγγελματική).
 - Την «Ειδική» κατηγορία και
 - Την «Πιστοποιημένη» κατηγορία
- Η άδεια πτητικής λειτουργίας αφορά στην «Ειδική» κατηγορία.
- Το πιστοποιητικό πτητικής ικανότητας (πιστοποιητικό αξιοπλοΐας) αφορά στις ιδιοκατασκευές και στα ΣμηΕΑ της «Πιστοποιημένης» κατηγορίας.
- Στην «Πιστοποιημένη» κατηγορία χορηγείται επίσης πιστοποιητικό νηολόγησης και το Remote Operations Certificate (ROC).
- Η άδεια εκμετάλλευσης ΣμηΕΑ χορηγείται σε όλους τους εκμεταλλεζόμενους/ επαγγελματίες πτητικού έργου ΣμηΕΑ.

Επιπλέον:

- Δεν επιτρέπεται η πτήση σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 400 ποδών (122 μέτρα) από το σημείο απογείωσης στο ανάγλυφο του εδάφους. Υπάρχει δυνατότητα υπέρβασης του συγκεκριμένου ορίου με σχετική άδεια για συγκεκριμένη ωστόσο πτήση.
- Απαγορεύεται η πτήση σε απόσταση μικρότερη των 50 μέτρων από τρίτα πρόσωπα.
- Επιτρέπεται η διεξαγωγή των πτήσεων ΣΜηΕΑ με λειτουργία σε απόσταση οπτικής επαφής (Visual Line of Sight-VLOS) ή και με λειτουργία σε απόσταση με επέκταση οπτικής επαφής (Extended Visual Line of Sight-EVLOS) θα διενεργείται στα χρονικά όρια μισής ώρας πριν την ανατολή του ηλίου έως μισής ώρας μετά την δύση του ηλίου. Οι πτήσεις ΣΜηΕΑ με λειτουργία σε απόσταση οπτικής επαφής (VLOS) θα διεξάγονται σε απόσταση μικρότερη από 500μ. από τον χειριστή τους, ενώ η αντίστοιχη μέγιστη απόσταση για τις πτήσεις ΣΜηΕΑ με λειτουργία σε απόσταση με επέκταση οπτικής επαφής (EVLOS) ή και μετά τη δύση του ηλίου, θα ορίζονται από τις ειδικές άδειες που θα χορηγούνται από την ΥΠΑ/Δ2, στην Ειδική και την Πιστοποιημένη Κατηγορία.
- Δεν επιτρέπεται η πτήση σε απόσταση μικρότερη των 8 χιλιομέτρων από ελεγχόμενο αεροδρόμιο.
- Επιτρέπεται η διεξαγωγή πτήσεων γενικά σε εναέριο χώρο, διαχωρισμένο από τον εναέριο χώρο που χρησιμοποιείται από τα

επανδρωμένα αεροσκάφη. Για τους χώρους αυτούς μπορεί να ενημερώνετε ο χειριστής στη ιστοσελίδα 'dagr.hcaa.gr' της υπηρεσίας πολιτικής αεροπορίας μέσω της εφαρμογής Drone Aware – GR (DAGR).

- Ο χειριστής, σε περίπτωση χρήσης για επαγγελματικούς σκοπούς, οφείλει να ασφαλίζει το UAV για ζημιές έναντι τρίτων και ειδικότερα έναντι υλικών ζημιών τρίτων έως 150.000 ευρώ και για σωματικές βλάβες έως 1.000.000 ευρώ.
- Για επαγγελματική χρήση (εμπορική εκμετάλλευση ΣμηΕΑ) απαιτείται εμπορική άδεια και καταβολή παραβόλων στην ΥΠΑ.

Έτσι με βάση τα παραπάνω ο προγραμματισμός του μηχανικού πρέπει να τηρεί αυτούς τους κανόνες και τις διατάξεις προσεκτικά, για την αποφυγή ατυχημάτων και παραβάσεων του νόμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 Γενικά

Το PhotoScan είναι ένα πρόγραμμα το οποίο απαιτεί πολλούς υπολογιστικούς πόρους για να ολοκληρώσει μια διαδικασία με επιτυχία. Εάν δεν έχει στη διάθεση του όλους τους αναγκαίους πόρους τότε μόνο μια διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από πολλές ώρες μέχρι κάποιες μέρες για να ολοκληρωθεί είτε να σταματήσει εντελώς και απροειδοποίητα κατά την εκτέλεση της.

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας συναντήθηκαν αρκετές φορές τα δύο φαινόμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς γινόταν προσπάθεια δημιουργίας του τριδιάστατου μοντέλου με όλες τις διαθέσιμες λήψεις. Μετά από αρκετές δοκιμές και διερεύνηση του προβλήματος διεξοδικά διαπιστώθηκε ότι αφενός οι 693 φωτογραφίες, στη συγκεκριμένη κιάλας ανάλυση, ήταν πολλές για να επεξεργαστούν από το διαθέσιμο υπολογιστικό σύστημα και αφετέρου ότι στις πλάγιες λήψεις, λόγω του ότι στις συγκεκριμένες πτήσεις οι λήψεις γίνονται χειροκίνητα, υπήρχαν πολύ μεγάλες επικαλύψεις και θεάσεις της ίδιας σκηνής. Το τελευταίο οδηγούσε το λογισμικό να επεξεργάζεται όλες τις διαθέσιμες λήψεις μόνο για ένα συγκεκριμένο χώρο ενώ δεν χρειαζόταν, γεγονός που επιβάρυνε την όλη διαδικασία και αύξανε γεωμετρικά το χρόνο περάτωσης της.

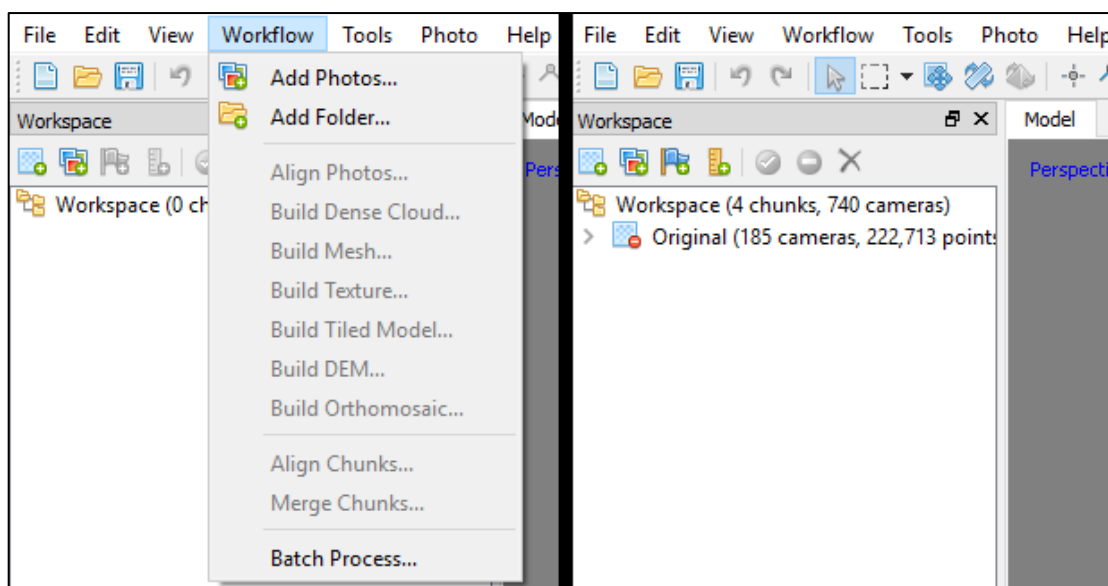
Μετά από πολλές δοκιμές και προσπάθειες να παραχθεί ένα ολοκληρωμένο τριδιάστατο μοντέλο επιτυχώς, διαπιστώθηκε ότι οι ναδρικές λήψεις δεν χρειαζόνταν καθόλου αφού τα κτίρια ενδιαφέροντος απεικονίζονταν και στις πλάγιες λήψεις και μάλιστα με περισσότερη λεπτομέρεια. Επίσης, από τις πλάγιες λήψεις χρειαζόνταν μόνο οι φωτογραφίες της κυκλικής πτήσης και όποιες άλλες φωτογραφίες ήταν αναγκαίες από την δεύτερη παρτίδα πλάγιων λήψεων προκειμένου να συμπληρωθεί στο μοντέλο η απαραίτητη πληροφορία.

Τελικά, επιλέχθηκαν συνολικά 185 φωτογραφίες, από τις πλάγιες λήψεις μόνο, οι οποίες τηρούσαν μια σωστή κατά πλάτος επικάλυψη και απεικόνιζαν λεπτομερώς όλο το αντικείμενο ενδιαφέροντος χωρίς να υπάρχουν κενά σημεία. Αυτές οι φωτογραφίες ήταν οι 43 της κυκλικής πτήσης και ακόμα 142 από τη δεύτερη πτήση των πλάγιων λήψεων.

3.2 Εισαγωγή δεδομένων

Οι φωτογραφίες που επιλέχθηκαν μπορούν είτε να εισαχθούν σαν ξεχωριστά αρχεία είτε να εισαχθεί ο φάκελος στον οποίο αυτές βρίσκονται. Το δεύτερο διευκολύνει την μεταφορά του αρχείου του τριδιάστατου μοντέλου σε ξεχωριστό φάκελο μαζί με τις φωτογραφίες αλλάζοντας απλά τη διαδρομή του του φακέλου των φωτογραφιών στον υπολογιστή. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να γίνει για κάθε φωτογραφία ξεχωριστά.

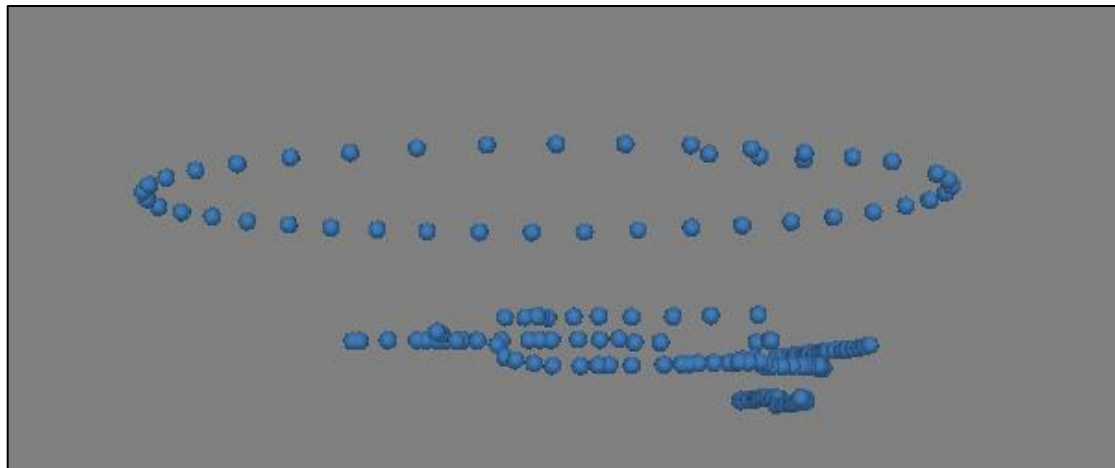
Εισάγοντας τις φωτογραφίες από την καρτέλα 'workflow' δημιουργείται το chunk, κατά ορολογία του λογισμικού. Σε ελληνική μετάφραση σημαίνει 'πολύ μεγάλο κομμάτι' και είναι στην ουσία το αρχείο μέσα στο πρόγραμμα στο οποίο βρίσκονται όλες οι φωτογραφίες που πρόκειται να επεξεργαστούν. Στο chunk θα γίνει η περαιτέρω εισαγωγή δεδομένων όπως τα φωτοσταθερά και η παραγωγή του μοντέλου. Το chunk (εικόνα 3.1) αποτελεί επιπλέον ένα μαξιλάρι ασφαλείας, καθώς μπορεί να αντιγραφεί αυτούσιο μέσα στο ίδιο το πρόγραμμα σε περίπτωση που πάει κάτι στραβά με την επεξεργασία και υπάρχει επιθυμία επιστροφής σε πιο αρχικό στάδιο της επεξεργασίας.



Εικόνα 3.1: Εισαγωγή φωτογραφιών και δημιουργία chunk

Οι μορφές των φωτογραφιών που δέχεται το PhotoScan είναι: JPEG, TIFF, PNG, BMP, PPM, OpenEXR και JPEG Multi-Picture Format (MPO). Οποιαδήποτε άλλη μορφή αρχείου φωτογραφίας θα πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε κάποια υποστηριζόμενη μορφή και ύστερα να εισαχθεί το πρόγραμμα.

Λόγω των ενσωματωμένων συντεταγμένων στις φωτογραφίες, κατά την εισαγωγή τους εμφανίζεται και η θέση τους στο χώρο. (εικόνα 3.2)



Εικόνα 3.2: Θέσεις των καμερών στο χώρο

Αφού εισαχθούν οι φωτογραφίες δίνεται, η δυνατότητα από το πρόγραμμα να ελεγχθούν μια-μια ώστε να διαπιστωθεί εάν είναι θολές σε σημεία που δεν φαίνεται με γυμνό μάτι. Η διαδικασία ελέγχου εφαρμόζεται σε όλες τις φωτογραφίες και παράγει ένα συντελεστή από το 0 (κακή ποιότητα) μέχρι το 1 (καλή ποιότητα) ο οποίος ωστόσο κάποιες φορές μπορεί να είναι και λίγο μεγαλύτερος της μονάδας λόγω των χαρακτηριστικών της φωτογραφίας (εικόνα 3.3).

Label	Size	Aligned	Quality
DJI_0243.JPG	5472x3648	✓	0.754169
DJI_0220.JPG	5472x3648	✓	0.799696
DJI_0222.JPG	5472x3648	✓	0.800634
DJI_0240.JPG	5472x3648	✓	0.80862
DJI_0216.JPG	5472x3648	✓	0.822081
DJI_0287.JPG	5472x3648	✓	0.834495
DJI_0283.JPG	5472x3648	✓	0.838246
DJI_0288.JPG	5472x3648	✓	0.840984
DJI_0045.JPG	5472x3648	✓	0.844224
DJI_0281.JPG	5472x3648	✓	0.849256
DJI_0048.JPG	5472x3648	✓	0.850386
DJI_0046.JPG	5472x3648	✓	0.851536
DJI_0284.JPG	5472x3648	✓	0.853044
DJI_0282.JPG	5472x3648	✓	0.853277

Εικόνα 3.3: Συντελεστής ποιότητας των λήψεων μετά τον έλεγχο

Δεν υπάρχει κάποιος κανόνας ο οποίος να ορίζει πιο είναι το ελάχιστο επιτρεπτό όριο ώστε μια φωτογραφία να θεωρείται καλής ποιότητας. Το

λογισμικό από μόνο του αν αξιολογήσει μια φωτογραφία με πολύ χαμηλό συντελεστή δεν θα τη χρησιμοποιήσει για τη συνταύτιση σημείων (alignment). Παρόλα αυτά, εμπειρικά από διάφορους χρήστες στο κόσμο, έχει διαπιστωθεί ότι οποιαδήποτε φωτογραφική λήψη με συντελεστή πάνω από 0.7 θεωρείται πολύ καλής ποιότητας και θα βοηθήσει στη παραγωγή ενός πολύ καλού, ακριβούς και λεπτομερούς μοντέλου.

Οι φωτογραφίες για τη δημιουργία του μοντέλου του πάρκου είχαν ένα συντελεστή που κυμάνθηκε από 0.75 μέχρι 1.06 το οποίο σημαίνει ότι ήταν πολύ καλής ποιότητας λήψεις χωρίς θολά σημεία. Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται στην εικόνα 3.3.

Αφού φορτώθηκαν και ελέγχθηκαν οι φωτογραφίες έγινε μετατροπή των συντεταγμένων τους από φ, λ, h στο WGS84 σε X, Y, H στο ΕΓΣΑ'87 (εικόνα 3.4). Κάθε φωτογραφία που λαμβάνει το drone έχει ενσωματωμένες συντεταγμένες (longitude, latitude, altitude) οι οποίες εμφανίζονται αυτόματα στο πρόγραμμα. Η μετατροπή είναι εύκολη και γίνεται αυτόματα επιλέγοντας στο κατάλληλο παράθυρο σαν σύστημα αναφοράς το GGRS87/Greek Grid (EPSG::2100) στο μενού Projected Coordinates Systems. Οι μετατροπή δίνει συντεταγμένες του κέντρου λήψης της φωτογραφίας στο ΕΓΣΑ'87 (Easting, Northing, Altitude). Το υψόμετρο παρόλα αυτά εμφανίζεται με αρνητική τιμή όπως διακρίνεται και στη παρακάτω εικόνα. Αυτό συμβαίνει διότι το λογισμικό αντιστρέφει τον άξονα z κατά την εισαγωγή δεδομένων. Πρόβλημα το οποίο λύνεται βέβαια με την ολοκλήρωση της γεωαναφοράς του μοντέλου. [10]

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0010.JPG	24.050395	37.725289	-55.357000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0013.JPG	24.050328	37.725264	-55.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0017.JPG	24.050287	37.725269	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0020.JPG	24.050237	37.725265	-54.557000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0024.JPG	24.050181	37.725244	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0028.JPG	24.050112	37.725236	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0032.JPG	24.050081	37.725231	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0035.JPG	24.050053	37.725230	-54.357000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0039.JPG	24.049984	37.725213	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0042.JPG	24.049923	37.725196	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0045.JPG	24.049885	37.725172	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0046.JPG	24.049871	37.725168	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0047.JPG	24.049844	37.725170	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0048.JPG	24.049831	37.725162	-54.457000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0049.JPG	24.049821	37.725154	-54.357000

Cameras	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0010.JPG	504291.436...	4175049.077...	-85.993929
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0013.JPG	504285.565...	4175046.337...	-86.093667
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0017.JPG	504281.966...	4175046.853...	-85.093606
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0020.JPG	504277.521...	4175046.481...	-85.193485
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0024.JPG	504272.597...	4175044.065...	-85.093260
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0028.JPG	504266.532...	4175043.171...	-85.093077
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0032.JPG	504263.798...	4175042.625...	-85.092988
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0035.JPG	504261.340...	4175042.521...	-84.992926
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0039.JPG	504255.209...	4175040.709...	-85.092700
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0042.JPG	504249.845...	4175038.765...	-85.092486
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0045.JPG	504246.566...	4175036.088...	-85.092288
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0046.JPG	504245.330...	4175035.650...	-85.092239
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0047.JPG	504242.955...	4175035.833...	-85.092192
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0048.JPG	504241.742...	4175035.010...	-85.092126
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0049.JPG	504240.885...	4175034.051...	-84.992063

Εικόνα 3.4: Μετατροπή συντεταγμένων

Η διαδικασία φόρτωσης των δεδομένων ολοκληρώνεται με την εισαγωγή της λίστας των επιλεγμένων τοποσταθερών για τη γεωαναφορά.

Επιλέχθηκαν 17 σημεία στο σύνολο. Τα 15 από αυτά είναι θέσεις ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλες τις επιφάνειες των κτιρίων, συντεταγμένες των οποίων είχαμε λόγω της γεωδαιτικής αποτύπωσης που είχε προηγηθεί. Τα υπόλοιπα δύο είναι φωτοσταθερά εδάφους που φαίνονται σε αρκετές φωτογραφικές λήψεις. Τα υπόλοιπα φωτοσταθερά εδάφους δεν χρησιμοποιήθηκαν καθώς βρίσκονται εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος και δεν φαίνονται καθόλου.

Κατά την εισαγωγή της λίστας συντεταγμένων το πρόγραμμα ρωτάει το χρήστη εάν επιθυμεί την δημιουργία σήμανσης (τοποθέτηση σημαίας/marker) στο χώρο της επεξεργασίας. Οι markers αυτοί τοποθετούνται στο χώρο και παραμένουν εκεί μέχρι να επεξεργαστούν από το χρήστη έχοντας ταυτόχρονα και την επιλογή να τους απενεργοποιήσει, ώστε να μην εμφανίζονται και εμποδίζουν την θέαση των υπόλοιπων δεδομένων.

Οι συντεταγμένες των τοποσταθερών που επιλέχθηκαν φαίνονται στον πίνακα 3.1 κατά αύξων αριθμό αποτύπωσης. Τα σημεία αυτά μπορούν να εντοπιστούν επακριβώς τόσο στα διαθέσιμα κροκί από την αποτύπωση όσο και στο τριδιάστατο ψηφιακό διάγραμμα. Η εύρεση της θέσης τους στο χώρο αλλά και το ακριβές σημείο στο οποίο αυτά στοχεύθηκαν είναι κρίσιμης σημασίας καθώς εξαρτάται ολόκληρη η γεωαναφορά και η ακρίβεια του μοντέλου από αυτό.

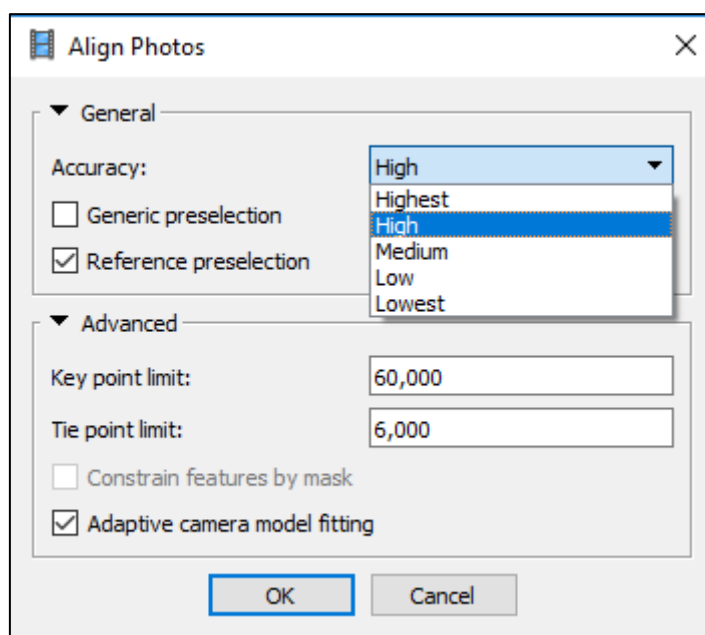
a/a	X	Y	H
315	504284.228	4175015.890	16.346
507	504290.126	4175036.344	10.737
555	504279.699	4175030.625	16.021
586	504261.762	4175024.890	15.844
604	504252.371	4175021.845	16.226
650	504267.081	4175035.440	10.698
685	504294.734	4174991.862	12.080
693	504257.133	4175007.279	16.206
752	504311.408	4174997.225	10.601
771	504304.297	4175019.013	10.626
811	504307.339	4175020.549	8.481
840	504321.832	4175003.365	5.565
859	504305.988	4175035.913	8.934
1026	504271.779	4174984.092	11.102
1035	504281.044	4174987.102	10.081
F2	504301.392	4175045.552	9.666
F16	504286.938	4174979.364	4.529

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες φωτοσταθερών στο ΕΓΣΑ'87

3.3 Συνταύτιση σημείων – Alignment

Στη συνταύτιση σημείων το πρόγραμμα αναζητά για κοινά σημεία ή αλλιώς σημεία σύνδεσης (tie points) ανάμεσα στις εικόνες με βάση κάποιες παραμέτρους που ορίζει ο χρήστης. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία παράγεται ένα αραιό νέφος σημείων (sparse cloud) στο οποίο εμφανίζονται όλα τα σημεία σύνδεσης ανάμεσα στις φωτογραφίες και δίνει και στο χρήστη μια πρώτη ματιά στο μοντέλο.

Από την καρτέλα workflow επιλέγεται το align photos και εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο ο χρήστης καλείται να καθορίσει τις παραμέτρους της συνταύτισης σημείων. Οι παράμετροι (εικόνα 3.5) αυτοί σχετίζονται με την ποιότητα της εικόνας που θα επεξεργαστεί το λογισμικό, τον τρόπο με τον οποίο θα ψάξει στις φωτογραφίες για κοινά σημεία και το πόσα σημεία σύνδεσης θα δημιουργήσει. Αποτελεί το πρώτο βήμα δημιουργίας ενός μοντέλου και είναι και από τα πιο σημαντικά, αφού το αραιό νέφος σημείων είναι η βάση όλης της διαδικασίας. [6]



Εικόνα 3.5: Παράμετροι συνταύτισης σημείων

Το παραπάνω παράθυρο διαλόγου δίνει στο χρήστη τις εξής επιλογές:

- Accuracy, στη οποία επιλέγεται η ποιότητα εικόνας με την οποία θα δουλέψει το λογισμικό. Στην επιλογή highest επεξεργάζεται την πρωτότυπη εικόνα στη πλήρη ανάλυση της ενώ για κάθε επιλογή πιο κάτω τη μικραίνει κατά 1/4.
- Preselection, όπου επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο το πρόγραμμα θα ερευνήσει στις φωτογραφίες για κοινά σημεία. Στο generic preselection

εντοπίζονται οι φωτογραφίες με κοινές θεάσεις προκειμένου να εντοπιστούν τα σημεία σύνδεσης ενώ στη reference preselection χρησιμοποιούνται τα δεδομένα GPS της εικόνας.

- Στις προχωρημένες δυνατότητες (advanced) ο χρήστης καλείται να διαλέξει τα όρια κοινών σημείων που θα εντοπιστούν σε κάθε φωτογραφία (key point limit) και πόσα από αυτά, συνήθως τα καλύτερα, θα ιδρυθούν στο αραιό νέφος σημείων (tie point limit).
- Η καρτέλα adaptive camera model fitting μένει πάντα ενεργοποιημένη και στην ουσία κατά την προσαρμογή του μοντέλου βοηθάει στο να παραχθεί ένα ορθό αποτέλεσμα λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωμετρία της κάμερας και τις συνθήκες πτήσης, εφόσον ένα UAV δεν μπορεί να διατηρήσει εύκολα μια σταθερή πορεία πτήσης.

Για τις ανάγκες του μοντέλου της διπλωματικής επιλέχθηκαν οι παράμετροι που εμφανίζονται στην εικόνα 3.5. Τα όρια κοινών σημείων επιλέγονται εν μέρει αυθαίρετα λαμβάνοντας όμως πάντα υπόψιν τις προεπιλογές του λογισμικού που είναι 40.000 key point limit και 4000 tie point limit. Επιλέχθηκαν μεγαλύτερες ανοχές ώστε να παραχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

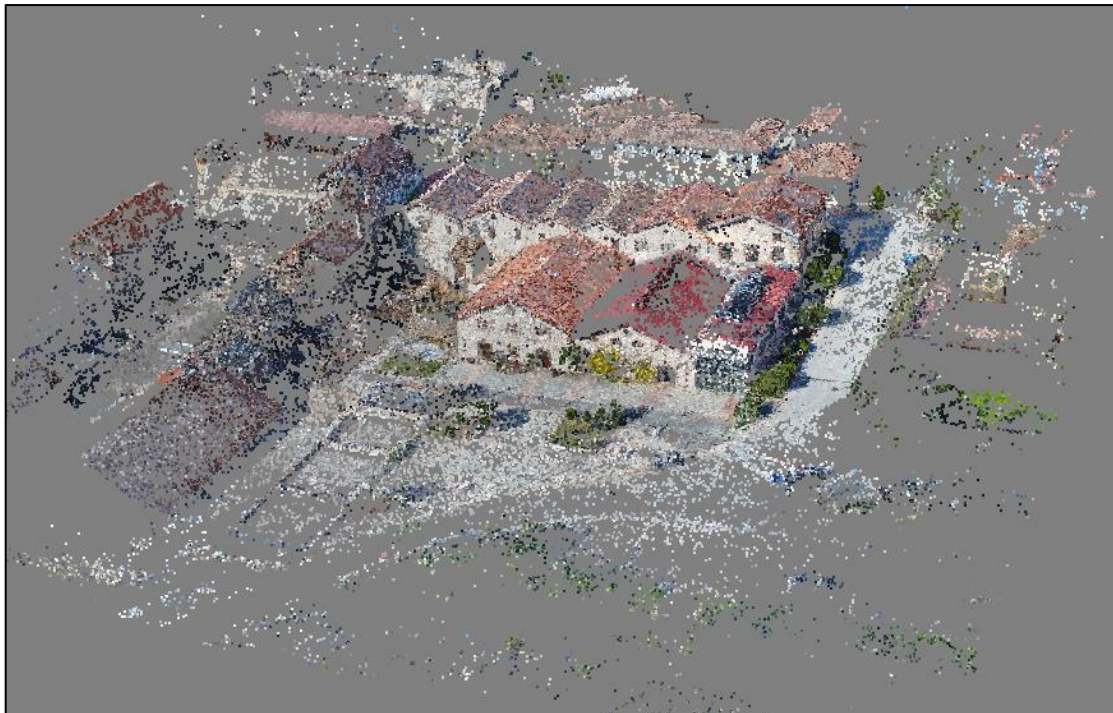
Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της ποσότητας των σημείων σύνδεσης που θα ιδρυθούν με το πέρας της διαδικασίας λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των εικόνων, τα κοινά σημεία που θα ιδρυθούν για κάθε εικόνα και τη ποιότητα της εικόνας που επιλέχθηκε στην καρτέλα accuracy.

Αφού καταχωρηθούν οι επιθυμητές παράμετροι μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία του alignment.

Η συνολική διάρκεια της είναι 20 λεπτά και με την περάτωση της έχουν δημιουργηθεί 277.997 σημεία, τα οποία αποτελούν το sparse cloud. Παρόλα αυτά, επειδή ο αλγόριθμος του λογισμικού εντοπίζει κοινά σημεία ακόμα και στον ουρανό ή σε άλλες περιοχές μακρινές από το σημείο ενδιαφέροντος υπάρχει ανάγκη διαγραφής των σημείων αυτών ώστε να επεξεργαστούν μόνο τα δεδομένα που θέλει ο χρήστης.

Διεγράφησαν συνολικά 50 χιλιάδες σημεία, καταλήγοντας με 222.713 σημεία σύνδεσης, και το τελικό αποτέλεσμα της συνταύτισης είναι αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.6.

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι υπάρχει πιθανότητα κάποιες φωτογραφίες να μην γίνονται align λόγω της κακής ποιότητας τους ή της ανεπαρκούς επικάλυψης. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί από το χρήστη στις πληροφορίες των εικόνων όπως φαίνεται και στη καρτέλα της εικόνας 3.3 στο υποκεφάλαιο 3.2. Στην περίπτωση του πάρκου στο Λαύριο δεν υπήρχε τέτοιο πρόβλημα και για αυτό παράχθηκε και ένα πολύ καλό αποτέλεσμα.



Εικόνα 3.6: Αραιό νέφος σημείων που προκύπτει από τη συνταύτιση

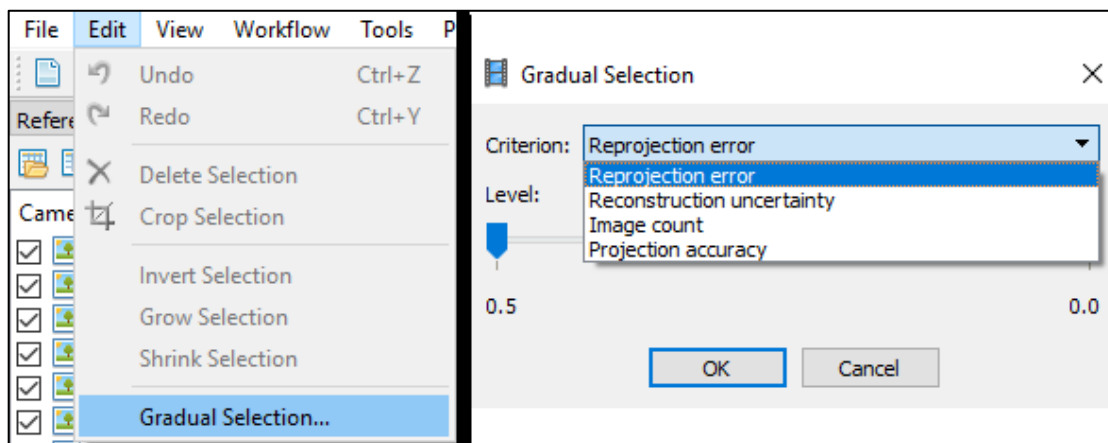
3.4 Γεωαναφορά και βελτιστοποίηση μοντέλου

Η γεωαναφορά του μοντέλου σε ένα γνωστό σύστημα συντεταγμένων αποτελεί το πιο σημαντικό στάδιο της παρούσας εφαρμογής αφού επιτρέπει τόσο την πιο σωστή και ορθή δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου όσο και τον έλεγχο του παραγόμενου προϊόντος. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση των φωτοσταθερών (Ground Control Points – GCP) που επιλέχθηκαν και αναφέρθηκαν παραπάνω. Είναι γενικά μια απλή αλλά χρονοβόρα για το χρήστη διαδικασία καθώς πρέπει να στοχευθούν οι δείκτες σε όσες περισσότερες εικόνες γίνεται και όσο πιο προσεκτικά γίνεται για να υπάρχει το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Ωστόσο πριν το στάδιο της γεωαναφοράς πρέπει να γίνει μια αρχική βελτιστοποίηση του sparse cloud. Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται προκειμένου να διαγραφούν σημεία τα οποία έχουν τοποθετηθεί λάθος στο χώρο ώστε να αυξηθεί και η ακρίβεια του παραγόμενου μοντέλου. Η διαδικασία αυτή πρέπει να πραγματοποιείται σε δύο στάδια, πριν και μετά τη γεωαναφορά, προσεκτικά παρόλα αυτά καθώς δεν είναι επιθυμητή η διαγραφή πολλών σημείων με αποτέλεσμα να χαθεί το καλιμπράρισμα των εικόνων και να μην υπάρχουν αρκετά σημεία σύνδεσης για να δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο. [11],[12].[13]

Ο καθαρισμός του sparse cloud για βελτιστοποίηση του μοντέλου πραγματοποιείται μέσα από ειδικό μενού στο λογισμικό. Παρακάτω θα

αναλυθούν όλα τα βήματα καθώς είναι σημαντική τόση η επιλογή των κατάλληλων βημάτων και μεταβλητών όσο και η σειρά εκτέλεσης τους. Με τη περάτωση όλων των βημάτων το αραιό νέφος σημείων είναι γεωαναφερμένο και απαλλαγμένο από τα σημεία που θα εισήγαγαν σφάλματα και δεν θα βοηθούσαν στη δημιουργία του τελικού μοντέλου.

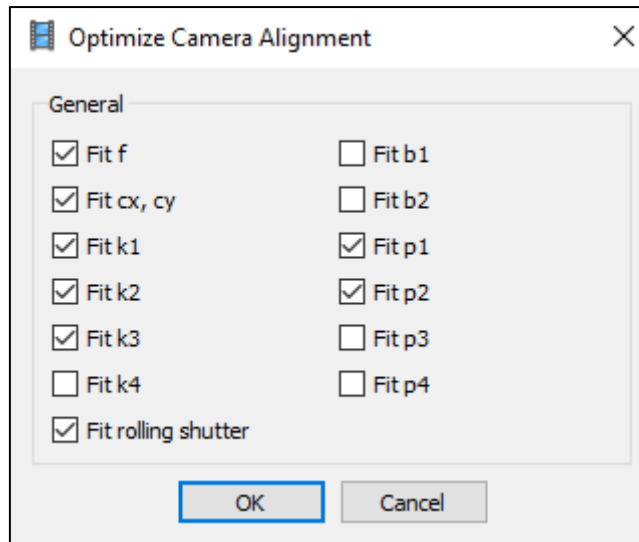


Εικόνα 3.7: Μενού για τη βελτιστοποίηση του sparse cloud

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα δίνονται τέσσερις επιλογές βελτιστοποίησης. Αυτές που θα πραγματοποιηθούν πριν τη γεωαναφορά και σχετίζονται με τις εικόνες είναι το reconstruction uncertainty και το projection accuracy. Το πρώτο εντοπίζει τα σημεία που παρουσιάζουν κακή γεωμετρία στο χώρο ενώ το δεύτερο τα σημεία κακής συνταύτισης. Η επιλογή image count δεν θα χρησιμοποιηθεί καθόλου στη παρούσα εφαρμογή.

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο, διορθώνονται οι θέσεις των καμερών στο χώρο διαγράφοντας τα σημεία των οποίων η προβολή στο χώρο είναι λανθασμένη (reconstruction uncertainty). Δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας για την επιλογή τιμής της μεταβλητής στο λογισμικό. Εμπειρικά από χρήστες σε όλο το κόσμο έχει διαπιστωθεί ότι το επίπεδο 10 (level 10) είναι ιδανικό για τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση. Τα επιλεγμένα σημεία στο sparse cloud εμφανίζονται με ροζ χρώμα και διαγράφονται. Είναι κρίσιμης σημασίας η επιλογή που κάνει το πρόγραμμα να είναι μικρότερη από το 50% των συνολικών σημείων του sparse cloud ή τουλάχιστον να μη τη ξεπερνάει κατά πολύ.

Κατόπιν γίνεται η βελτιστοποίηση των θέσεων της κάμερας στο χώρο από το μενού optimize camera positions. Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγονται οι μεταβλητές f , c_x , c_y , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2 και το fit rolling shutter. Οι μεταβλητές αυτές όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8 είναι:



Εικόνα 3.8: Μεταβλητές βελτιστοποίησης

- f : εστιακή απόσταση της κάμερας
- cx, cy : κέντρο της λήψης της κάμερας – πρωτεύον σημείο (x,y)
- k -values: μεταβλητές διόρθωσης ακτινικής διαστρόφης
- p -values: μεταβλητές διόρθωσης εφαπτομενικής διαστρόφης
- b -values: μεταβλητές διόρθωσης αφινικών παραμορφώσεων

Όταν ολοκληρωθεί η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνονται αυτούσια τα βήματα του πρώτου σταδίου ξανά για άλλες δύο φορές. Είναι σημαντικό να γίνεται βελτιστοποίηση των καμερών μετά από κάθε διαγραφή σημείων προκειμένου να γίνει εκ νέου υπολογισμός της θέσης τους και των σφαλμάτων που είναι εκφρασμένα σε pixel.

Στο δεύτερο στάδιο διαγράφονται τα σημεία κακής συνταύτισης με την επιλογή projection accuracy. Επιλέγεται ξανά το επίπεδο 10 αλλά αυτή τη φορά ο αλγόριθμος επιλέγει λιγότερα σημεία από το πρώτο στάδιο πράγμα που είναι λογικό αφού οι φωτογραφίες είναι πολύ καλής ποιότητας και έγινε και συνταύτιση με τη πλήρη ανάλυσή τους. Τα επιλεγμένα σημεία διαγράφονται και πραγματοποιείται εκ νέου βελτιστοποίηση των καμερών με τις ίδιες μεταβλητές του προηγούμενου σταδίου.

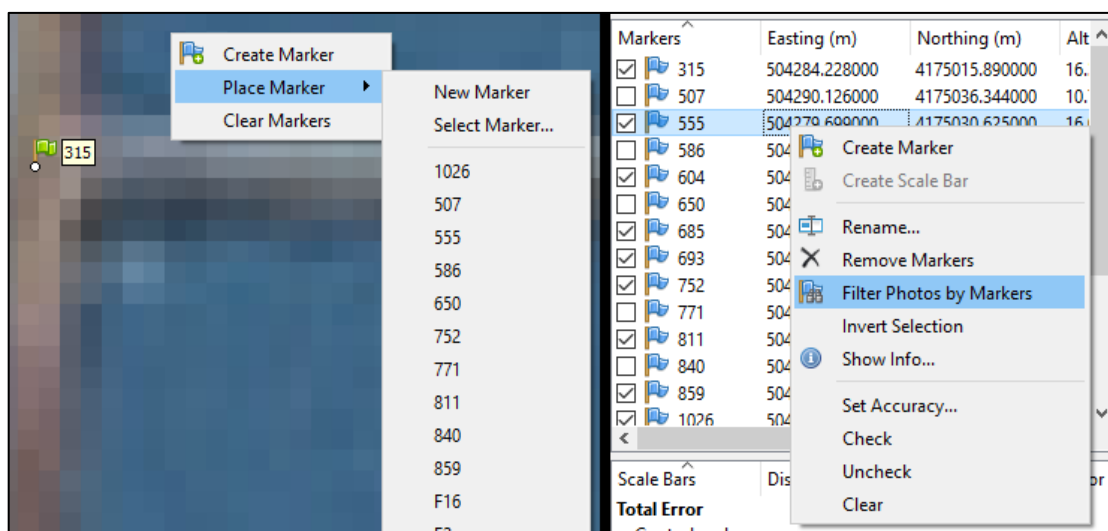
Αφού επαναληφθεί και αυτό το στάδιο άλλες δυο φορές, με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε και στο πρώτο, το αραιό νέφος σημείων έχει πλέον πολύ λιγότερα σημάδια και καλύτερη ακρίβεια και είναι πλέον έτοιμο για τη γεωαναφορά και το τρίτο στάδιο βελτιστοποίησης.

Αφού εισαχθεί το αρχείο με τις συντεταγμένες των τοποσταθερών εμφανίζονται μικρές σημαίες στο χώρο. Οι σημαίες (markers) των φωτοσταθερών φαίνονται πιο ψηλά μέσα στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος λόγω του εσφαλμένου υψομέτρου των φωτογραφιών, και κατά συνέπεια του sparse cloud, που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επίσης

δεν μπορεί να προσδιοριστεί κατευθείαν η θέση όλων οριζοντιογραφικά από ένα χρήστη που δεν ήταν παρών στη σήμανση τους, για αυτό και είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός κροκί στο οποίο θα φαίνεται η θέση τουλάχιστον 3 σημείων.

Η στόχευση των τοποσταθερών είναι γενικά μια χρονοβόρα διαδικασία. Αρχικά στο sparse cloud επιλέγονται τα σημεία εκείνα μιας περιοχής που υπάρχει η θέση του τοποσταθερού και φιλτράρονται οι εικόνες με βάση αυτή την επιλογή. Στις φωτογραφίες που εμφανίζονται τοποθετείται ο marker στο επιθυμητό σημείο μέσα από το μενού που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για το ίδιο τοποσταθερό σε άλλη φωτογραφία. Με το που γίνουν δυο στοχεύσεις για το ίδιο σημείο, τοποθετείται σημαία σε μια προσεγγιστική θέση σε όλες τις φωτογραφίες που φαίνεται αυτό. Η παραπάνω διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί με τον ίδιο τρόπο για άλλα δυο τοποσταθερά.

Με το πέρας της στόχευσης τριών σημείων αποκτά ολόκληρο το sparse cloud θέση στο χώρο και ταυτόχρονα όλα τα φωτοσταθερά προσεγγιστική θέση στις φωτογραφίες. Τέλος για να σημανθούν και όλα τα υπόλοιπα φιλτράρονται οι φωτογραφίες με βάση των markers τους οποίους εμφανίζουν (εικόνα 3.9) και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία συνέχεια μέχρι να έχουν στοχευθούν όλα τα τοποσταθερά σε όσες περισσότερες εικόνες γίνεται. [7]



Εικόνα 3.9: Τοποθέτηση markers στις φωτογραφίες

Με την ολοκλήρωση της στόχευσης πρέπει να γίνει το τρίτο στάδιο βελτιστοποίησης της θέσης των καμερών στο χώρο (optimize camera positions) με βάση τα τοποσταθερά και όχι τις ενσωματωμένες συντεταγμένες των φωτογραφιών. Για αυτό το λόγο απενεργοποιούνται όλες οι κάμερες στο αριστερό μενού του προγράμματος ώστε να μη

συμμετέχουν στην αποκατάσταση του απόλυτου προσανατολισμού αφού έχουν λιγότερο ακριβείς συντεταγμένες από τα τοποσταθερά.

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 315	0.002507	0.011426	-0.002383	0.005000	0.011938	52	0.214
<input checked="" type="checkbox"/> 507	-0.007791	-0.008672	0.015277	0.005000	0.019217	21	0.265
<input checked="" type="checkbox"/> 555	0.006963	-0.008503	0.004021	0.005000	0.011703	14	0.167
<input checked="" type="checkbox"/> 586	0.001370	0.004900	0.002236	0.005000	0.005558	15	0.239
<input checked="" type="checkbox"/> 604	0.006470	-0.005812	0.002008	0.005000	0.008926	15	0.232
<input checked="" type="checkbox"/> 650	0.000234	0.003972	-0.006266	0.005000	0.007423	18	0.162
<input checked="" type="checkbox"/> 685	-0.001323	0.017815	0.000376	0.005000	0.017868	30	0.205
<input checked="" type="checkbox"/> 693	-0.006928	0.001160	0.001461	0.005000	0.007174	47	0.169
<input checked="" type="checkbox"/> 752	0.001135	-0.003535	0.005886	0.005000	0.006959	47	0.149
<input checked="" type="checkbox"/> 771	-0.007606	0.005868	0.005146	0.005000	0.010898	50	0.299
<input checked="" type="checkbox"/> 811	-0.010536	0.000875	0.007894	0.005000	0.013194	40	0.369
<input checked="" type="checkbox"/> 840	0.005530	-0.006667	-0.004707	0.005000	0.009858	24	0.111
<input checked="" type="checkbox"/> 859	0.007979	-0.001247	-0.007606	0.005000	0.011094	31	0.218
<input checked="" type="checkbox"/> 1026	0.012373	-0.009812	-0.011415	0.005000	0.019485	21	0.375
<input checked="" type="checkbox"/> 1035	-0.006915	0.003692	-0.000123	0.005000	0.007840	25	0.453
<input checked="" type="checkbox"/> F2	0.000792	0.004333	-0.011963	0.005000	0.012749	15	0.204
<input checked="" type="checkbox"/> F16	-0.004277	-0.009834	-0.000063	0.005000	0.010724	23	0.153
Total Error							
Control points	0.006386	0.007629	0.006785		0.012043		0.252
Check points							

Εικόνα 3.10: Πίνακας φωτοσταθερών

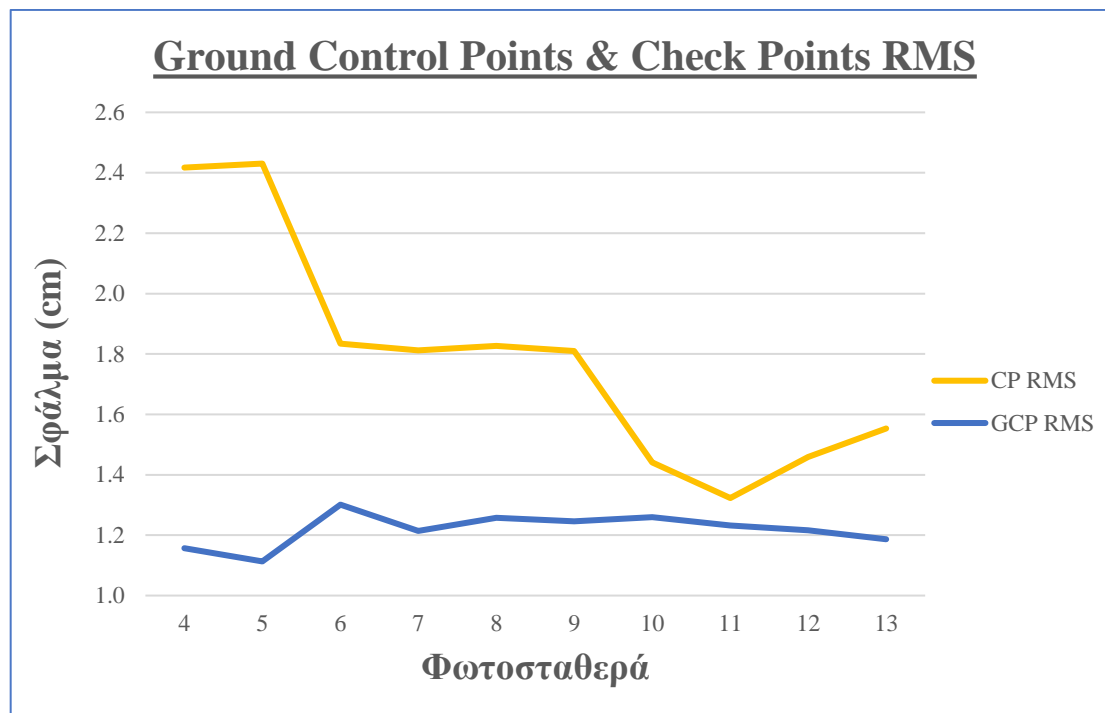
Στην παραπάνω εικόνα όλα τα σημεία χρησιμοποιούνται σαν τοποσταθερά αφού είναι ενεργοποιημένα και επίσης φαίνονται τα σφάλματα για κάθε σημείο όπως και σε πόσες φωτογραφίες έχουν στοχευθεί. Το συνολικό σφάλμα που φαίνεται κάτω (Control points total error) είναι το σφάλμα του μετασχηματισμού (RMS) και είναι στην ουσία η διαφορά των πραγματικών συντεταγμένων από αυτές που υπολόγισε το λογισμικό κατά την επίλυση.

Παρόλα αυτά πρέπει να υπάρχουν και σημεία ελέγχου (Check points) και για αυτό το λόγο ο μετασχηματισμός θα γίνει με χρήση λιγότερων τοποσταθερών και όχι και τα 17.

Σκοπός είναι να βγει και ένα συμπέρασμα για το σφάλμα που έχουν τα σημεία στη θέση που στοχεύθηκαν από το χρήστη σε σχέση με την υπολογισμένη θέση του μετασχηματισμού. Αυτό το σφάλμα είναι το πιο σημαντικό καθώς δείχνει την ακρίβεια όλου του μοντέλου.

Πρώτα όμως πρέπει να γίνει μια διερεύνηση για το πόσα τοποσταθερά αρκούν ώστε να επιτευχθεί ένας καλός μετασχηματισμός και να υπάρχει παράλληλα και καλή ακρίβεια στο μοντέλο. Χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί σημείων και σε διαφορετικές ποσότητες κάθε φορά προκειμένου να βγει ένα τεκμηριωμένο συμπέρασμα για τη συγκεκριμένη

περίπτωση. Στο διάγραμμα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται η διερεύνηση που έγινε.



Διάγραμμα 3.1: Σχέση αριθμού τοποσταθερών με τα συνολικά σφάλματα

Όπως παρατηρείται από το γράφημα η σχέση των δύο σφαλμάτων δεν είναι ανάλογη αλλά ούτε και ποσοτικά ίδια. Το σφάλμα του μετασχηματισμού (RMS GCP) κυμαίνεται στο ίδιο εύρος τιμών ανεξάρτητα από τον αριθμό των σημείων που χρησιμοποιούνται σαν τοποσταθερά.

Αντιθέτως, το σφάλμα του μοντέλου (RMS CP) μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των τοποσταθερών όχι όμως γραμμικά. Συνεπώς, επιλέγεται ο πιο κατάλληλος συνδυασμός 11 τοποσταθερών και τα 6 σημεία που απομένουν θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία ελέγχου. Παρακάτω, στην εικόνα 3.11, φαίνονται οι ακρίβειες του μετασχηματισμού και του μοντέλου.

Αφού βρέθηκε λοιπόν ο ιδανικός αριθμός τοποσταθερών και σημείων ελέγχου εφαρμόζεται το τρίτο και τελευταίο στάδιο βελτιστοποίησης στο οποίο διαγράφονται τα σημεία του sparse cloud με reprojection error μεγαλύτερο από 0.5. Στην αντίστοιχη επιλογή του gradual selection επιλέγεται το επίπεδο 0.5 και διαγράφονται τα σημεία που εντοπίστηκαν. Κατόπιν πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά όλες τις μεταβλητές της κάμερας ($f, c_x, c_y, k_1, k_2, k_3, k_4, b_1, b_2, p_1, p_2, p_3, p_4$ και το fit rolling shutter). Όπως και στα προηγούμενα στάδια η παραπάνω διαδικασία πρέπει να γίνει άλλες δυο φορές.

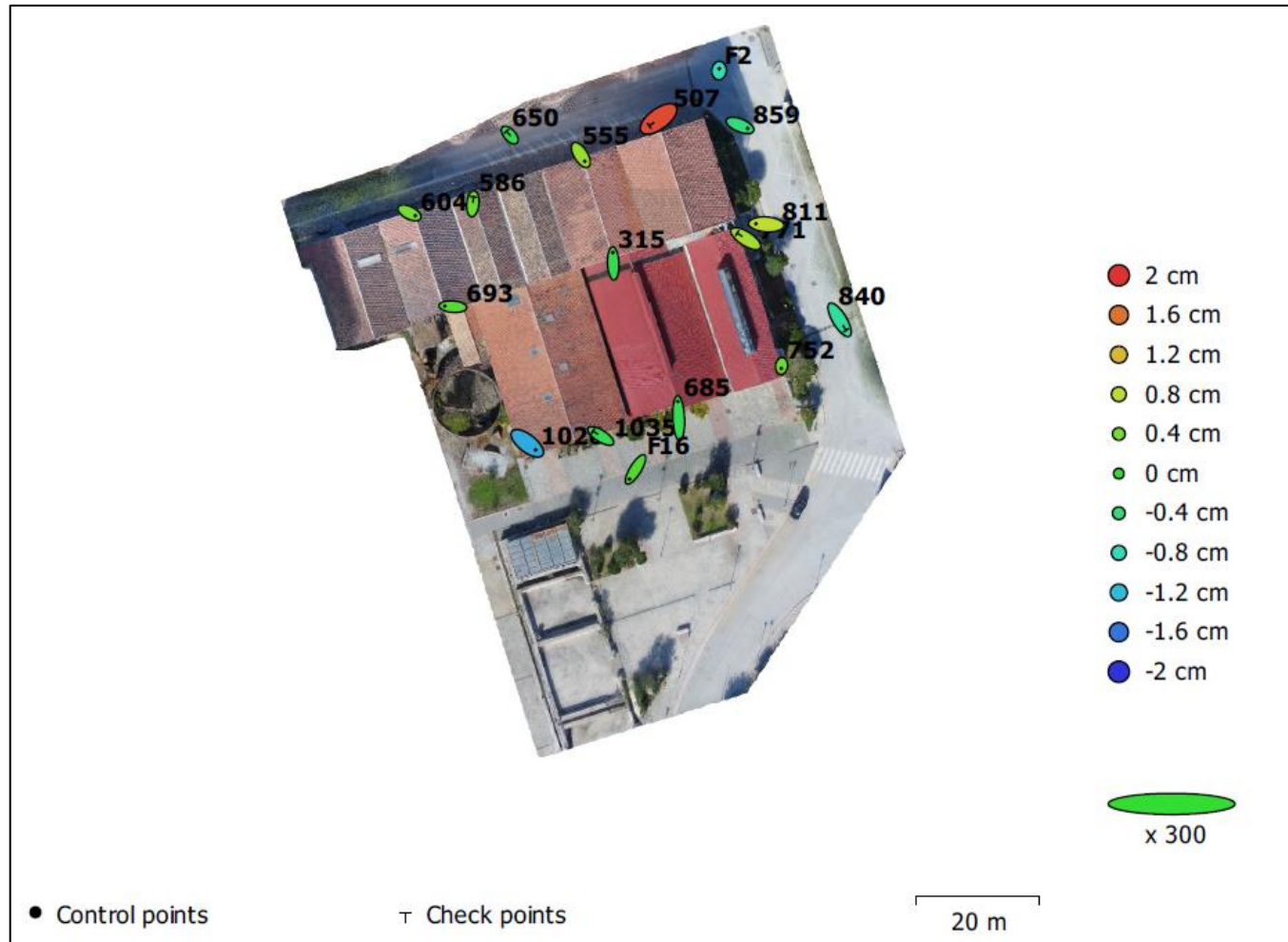
Cameras	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Yaw err (°)
<input type="checkbox"/> DJI_0010.JPG	-0.513461	2.374335	109.113248	10.000000	109.140286	
<input type="checkbox"/> DJI_0013.JPG	-0.940996	2.496970	109.222832	10.000000	109.255423	
<input type="checkbox"/> DJI_0017.JPG	-0.535649	2.581855	109.689395	10.000000	109.721084	
<input type="checkbox"/> DJI_0020.JPG	-0.698264	2.364875	109.916608	10.000000	109.944263	
<input type="checkbox"/> DJI_0024.JPG	-0.577999	2.109132	110.048053	10.000000	110.069780	
<input type="checkbox"/> DJI_0028.JPG	-0.459366	1.985927	110.023394	10.000000	110.042274	
<input type="checkbox"/> DJI_0032.JPG	-0.620788	2.044797	110.055139	10.000000	110.075883	
<input type="checkbox"/> DJI_0035.JPG	-0.344676	1.812020	109.891562	10.000000	109.907056	

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projec	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 315	-0.000654	0.012094	-0.000540	0.005000	0.012124	52	0.212
<input type="checkbox"/> 507	-0.010235	-0.008028	0.019259	0.005000	0.023240	21	0.263
<input checked="" type="checkbox"/> 555	0.004662	-0.007208	0.006930	0.005000	0.011032	14	0.166
<input type="checkbox"/> 586	0.000336	0.007432	0.004844	0.005000	0.008877	15	0.238
<input checked="" type="checkbox"/> 604	0.006299	-0.003651	0.003647	0.005000	0.008143	15	0.231
<input type="checkbox"/> 650	-0.001511	0.004728	-0.003113	0.005000	0.005859	18	0.162
<input checked="" type="checkbox"/> 685	-0.003808	0.018353	0.000265	0.005000	0.018745	30	0.203
<input checked="" type="checkbox"/> 693	-0.008327	0.002668	0.002173	0.005000	0.009010	47	0.169
<input checked="" type="checkbox"/> 752	0.000280	-0.005055	0.005743	0.005000	0.007656	47	0.149
<input type="checkbox"/> 771	-0.009388	0.005818	0.006946	0.005000	0.013047	50	0.301
<input checked="" type="checkbox"/> 811	-0.010742	0.000167	0.009471	0.005000	0.014322	40	0.370
<input type="checkbox"/> 840	0.009392	-0.012255	-0.006845	0.005000	0.016889	24	0.110
<input checked="" type="checkbox"/> 859	0.007603	-0.002269	-0.005295	0.005000	0.009539	31	0.218
<input checked="" type="checkbox"/> 1026	0.010383	-0.007851	-0.012129	0.005000	0.017792	21	0.375
<input type="checkbox"/> 1035	-0.008991	0.004900	-0.000595	0.005000	0.010257	25	0.452
<input checked="" type="checkbox"/> F2	-0.000516	0.003338	-0.008856	0.005000	0.009478	15	0.203
<input checked="" type="checkbox"/> F16	-0.005221	-0.010563	-0.001544	0.005000	0.011884	23	0.153
Total Error							
Control points	0.006392	0.007943	0.005947		0.011803		0.233
Check points	0.007258	0.007257	0.008504		0.013329		0.288

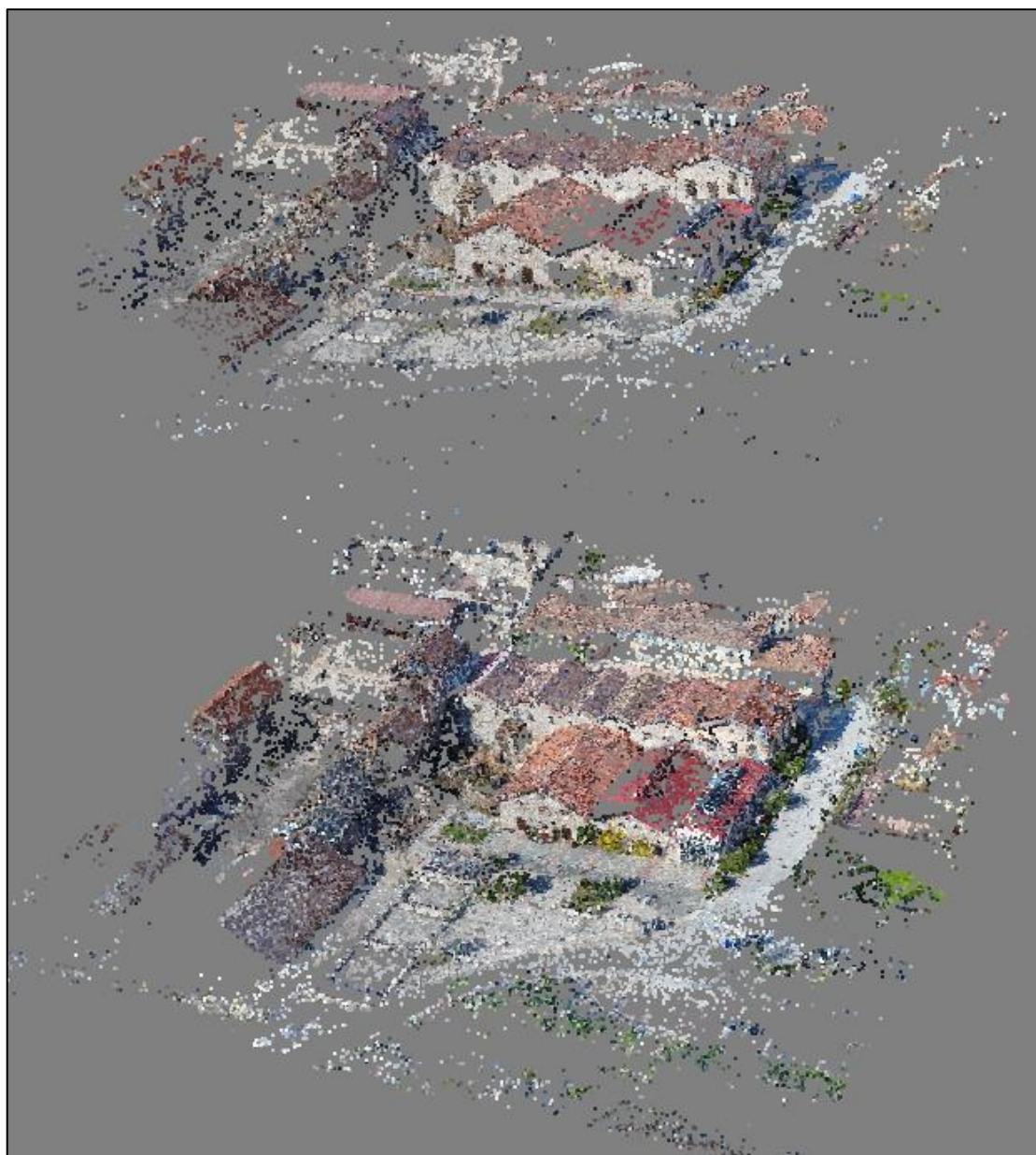
Εικόνα 3.11: Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης καμερών και γεωαναφοράς

Όπως διακρίνεται στην εικόνα 3.11 το συνολικό σφάλμα του μετασχηματισμού είναι ± 1.2 cm ενώ του μοντέλου ± 1.3 cm χρησιμοποιώντας ως τοποσταθερά και σημεία ελέγχου τα σημεία που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. Το RMS σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) διαμορφώθηκε στα 0.288 pixel. Ο συνδυασμός των σημείων που επιλέχθηκε δεν είναι εντελώς τυχαίος αφού παρουσιάζουν μια καλή κατανομή στο χώρο και δίνουν παράλληλα τα βέλτιστα αποτελέσματα. Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζονται οπτικά τα σφάλματα των σημείων. Το χρώμα της έλλειψης του σφάλματος δηλώνει την υψομετρική

απόκλιση και η έλλειψη του σφάλματος είναι μεγεθυμένη κατά 300 φορές
ώστε να φαίνεται η μορφή της στην εικόνα.



Εικόνα 3.12: Οπτικοποίηση σφαλμάτων



Εικόνα 3.13: Αρχικό (κάτω) και τελικό (πάνω) sparse cloud

Το τελικό αραιό νέφος σημείων (εικόνα 3.13) μετά τη γεωαναφορά και τη βελτιστοποίηση έχει 81.775 σημεία και φαίνεται στην παραπάνω εικόνα στη πάνω μεριά. Έχει πλέον αποκτήσει σωστή κλίμακα, θέση και προσανατολισμό και είναι έτοιμο για πυκνώση (dense point cloud), δημιουργία τριγώνων (meshing) και προσθήκη των υφών για παραγωγή του τελικού μοντέλου (texturing).

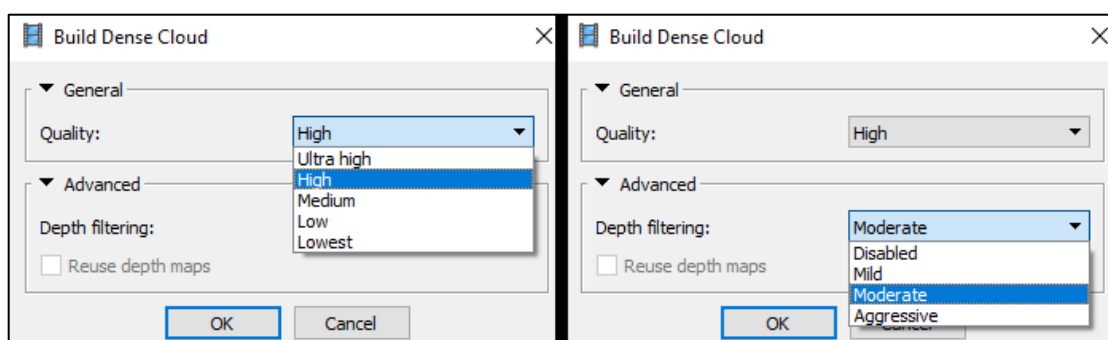
3.5 Παραγωγή μοντέλου

Για να ολοκληρωθεί το τριδιάστατο μοντέλο πρέπει να εκτελεστεί μια καθορισμένη σειρά βημάτων, τα οποία αποτελούν και το πιο χρονοβόρο στάδιο της διαδικασίας. Πρέπει να πυκνωθεί το αραιό νέφος σημείων, να δημιουργηθούν τα τρίγωνα των επιφανειών από αυτά τα σημεία και τέλος να προστεθεί η κατάλληλη υφή ώστε να είναι όσο πιο ρεαλιστικό γίνεται.

Στο πρόγραμμα, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα επιλογής της ποιότητας του dense cloud και της γενίκευσης που θα κάνει ο αλγόριθμος. Επιλέχθηκε η ποιότητα high και στις προχωρημένες ρυθμίσεις η μέτρια γενίκευση (moderate). Οι δυο αυτές παράμετροι, ανάλογα με τις λεπτομέρειες της φυσικής επιφάνειας, μπορούν είτε να μειώσουν το χρόνο παραγωγής αισθητά είτε να τον αυξήσουν κατά πολύ.

Η ποιότητα της φωτογραφίας που χρησιμοποιεί το λογισμικό μειώνεται κατά 1/4 για κάθε επιλογή κάτω από την υψηλότερη. Στις προχωρημένες ρυθμίσεις, πριν επιλέξει ο χρήστης την γενίκευση που θέλει πρέπει να έχει υπόψιν το σκοπό για τον οποίο παράγει το τριδιάστατο μοντέλο και τη φυσική επιφάνεια της οποία θέλει να αναδημιουργήσει. Εάν υπάρχουν πολλές μικρές και σημαντικές λεπτομέρειες επιλέγεται η παράμετρος mild. Αντιθέτως εάν το φυσικό αντικείμενο δεν έχει περίεργη γεωμετρία τότε μπορεί να επιλεγθεί η παράμετρος aggressive για μεγαλύτερη γενίκευση και μικρότερο χρόνο επεξεργασίας. Τέλος, εάν το φυσικό αντικείμενο είναι κάπου ενδιάμεσα τότε επιλέγεται η moderate γενίκευση. [14]

Στην εικόνα 3.14 παρουσιάζονται οι μεταβλητές πύκνωσης που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο.

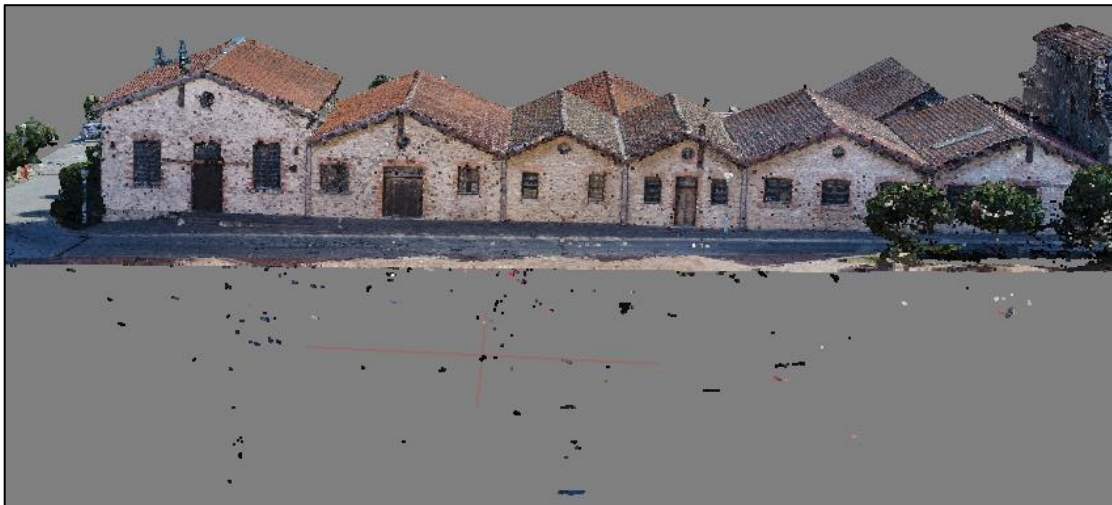


Εικόνα 3.14: Επιλογές πύκνωσης σημείων

Η διαδικασία της πύκνωσης του sparse cloud διήρκτησε 10 ώρες και 30 λεπτά και με το πέρας της το dense point cloud είχε 49 εκατομμύρια σημεία. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15: Dense point cloud



Εικόνα 3.16: Σημεία πυκνώσης με εσφαλμένη θέση

Εκ πρώτης όψεως το αποτέλεσμα ήταν πολύ καλό και ποιοτικό με πολύ λίγα σημεία του χώρου να έχουν αναδημιουργηθεί εσφαλμένα ή και καθόλου (εικόνα 3.16). Τα σημεία που έχουν δημιουργηθεί εσφαλμένα πρέπει να διαγραφούν αφού δεν είναι επιθυμητή η δημιουργία τριγώνων στη θέση τους. Για τις επιφάνειες που δεν έχουν αναδημιουργηθεί καθόλου δεν μπορεί να γίνει κάτι πάρα μόνο μια εκτίμηση από το χρήστη για το πόσο σημαντική ή όχι είναι η απώλεια των σημείων πυκνώσης εκεί.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.16 υπάρχουν σημεία των οποίων η θέση είναι πολύ πιο κάτω από το πραγματικό μοντέλο. Η ποσότητα τους δεν είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να επιλέγονται προσεκτικά και διαγράφονται.

Ταυτόχρονα όμως, υπάρχει και ένα συγκεκριμένο κτίριο το οποίο παρουσιάζει πολλές κενές επιφάνειες. Τα σημεία από αυτές τις κενές επιφάνειες είτε δεν υπάρχουν καθόλου είτε βρίσκονται πιο μέσα στο εσωτερικό του κτιρίου (εικόνα 3.17). Αυτό συνέβη διότι η υφή και το χρώμα του τοίχου στο συγκεκριμένο κτίριο δεν επέτρεψαν εξαρχής τον εντοπισμό και τη δημιουργία πολλών σημείων σύνδεσης με συνέπεια και κατά το στάδιο της πύκνωσης ο αλγόριθμος να μην καταφέρει να προσδιορίσει με ακρίβεια τη θέση των σημείων. Οι επιφάνειες αυτές θα καλυφθούν στο στάδιο του meshing παρουσιάζοντας όμως έντονες παραμορφώσεις.

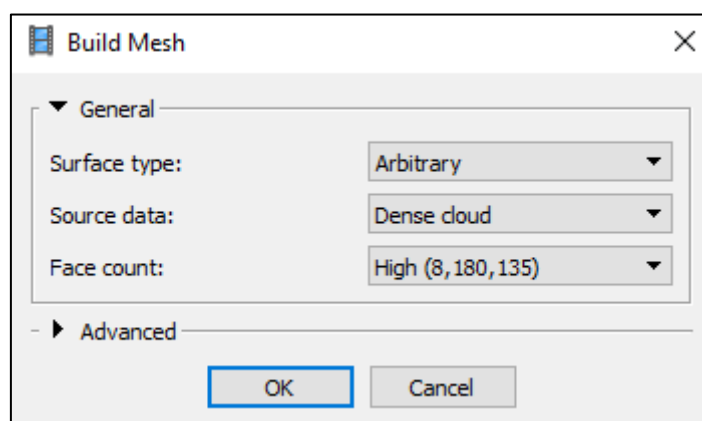


Εικόνα 3.17: Επιφάνεια χωρίς καλή πύκνωση

Πριν ξεκινήσει η δημιουργία επιφανειών ήταν αναγκαία η διαγραφή ορισμένων κομματιών από το πυκνό νέφος σημείων προκειμένου να ολοκληρωθεί με επιτυχία η δημιουργία τριγώνων. Τα τρίγωνα που υπολόγιζε το λογισμικό για δημιουργία δεν ήταν εφικτό να δημιουργηθούν λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών πόρων. Διεγράφησαν, λοιπόν σημεία που δεν ήταν απαραίτητα και το πυκνό νέφος σημείων με τα εναπομείναντα 41 εκατομμύρια σημεία είναι έτοιμο για δημιουργία επιφανειών.

Η διαδικασία της δημιουργίας τριγώνων για τις επιφάνειες διήρκησε 44 λεπτά και παρήχθησαν συνολικά 8.180.135 πρόσωπα (faces) και 4.093.719 κορυφές (vertices).

Ως πρωτογενή δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν αυτά του πυκνού νέφους σημείων, ο υψηλότερος αριθμός προσώπων και αυθαίρετη ποιότητα ανακατασκευής (arbitrary). Στην ποιότητα ανακατασκευής δίνονται δυο επιλογές. Αυτή που προαναφέρθηκε που δημιουργεί όλες τις διαθέσιμες επιφάνειες σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και επίσης η επιλογή height field η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή ορθοφωτοχαρτών.



Εικόνα 3.18: Παράμετροι meshing

Το παράγωγο του meshing μοιάζει αρκετά με το τελικό τριδιάστατο μοντέλο και πιο πολύ με ένα ρεαλιστικό συγκρότημα κτιρίων, σε σχέση με το προηγούμενο στάδιο.

Παρόλα αυτά δεν λείπουν και από αυτό το παράγωγο κάποιες αστοχίες. Μια συγκεκριμένη στέγη κτιρίου δεν ανακατασκευάστηκε επιτυχώς με αποτέλεσμα να έχει κενά σημεία (εικόνα 3.19). Αυτό συνέβη παρά το γεγονός ότι στο dense point cloud εντοπίζονται στη συγκεκριμένη θέση τα διαθέσιμα σημεία. Από την άλλη εντοπίζονται και οι παραμορφώσεις για τις οποίες έγινε λόγος παραπάνω η οποίες μειώνουν αρκετά την αισθητική του αποτελέσματος και ιδίως του συγκεκριμένου κτιρίου (εικόνα 3.20).



Εικόνα 3.19: Κενά σημεία σε στέγη

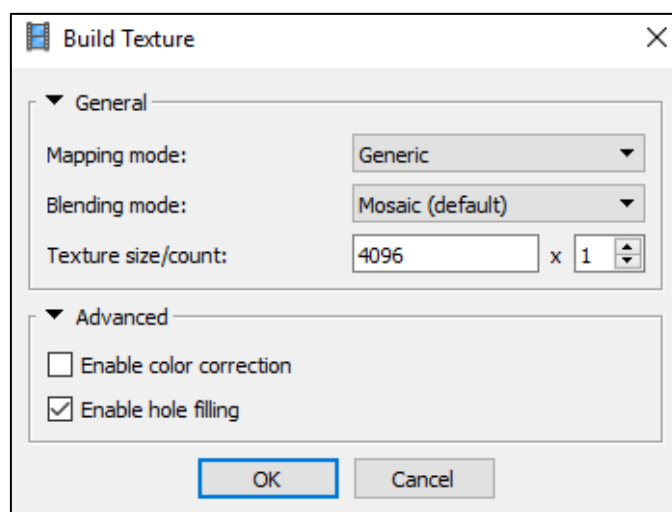


Εικόνα 3.20: Παραμορφώσεις επιφάνειας κακής πύκνωσης

Με την ολοκλήρωση του meshing το μόνο που έχει απομείνει είναι η προσθήκη της υφής στο μοντέλο που αποτελεί και το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας.

Από το μενού που παρέχεται από το λογισμικό επιλέγονται οι παράμετροι που φαίνονται στην εικόνα 3.21. Η παράμετρος enable hole

filling επιτρέπει τη δημιουργία υφής στα κενά ή παραμορφωμένα σημεία, πράγμα που βοηθάει στην περίπτωση του παρόντος μοντέλου στο κτίριο που αναφέρθηκε ότι παρουσιάζει πρόβλημα.

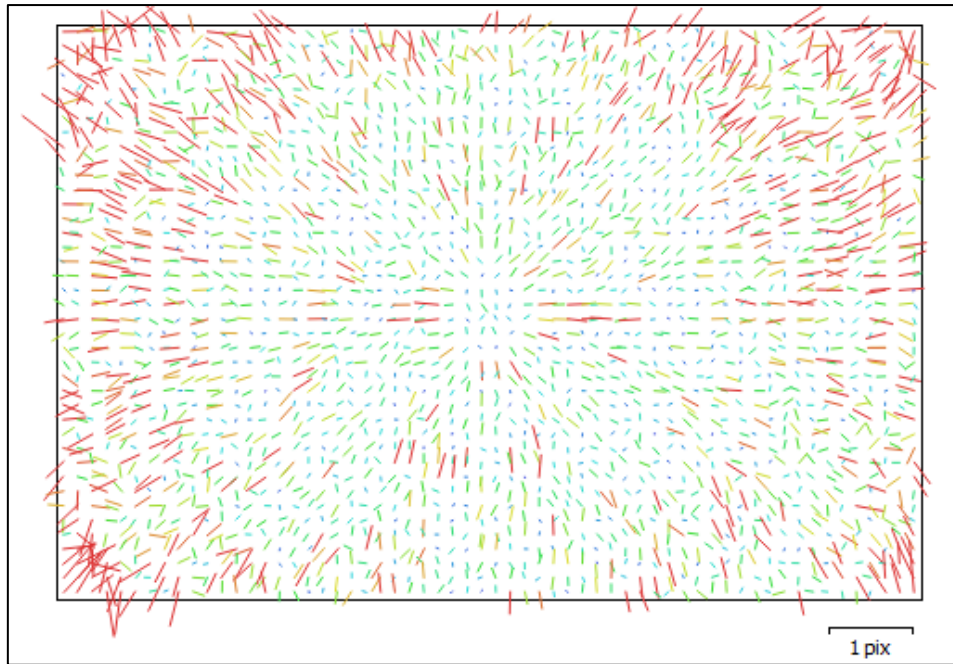


Εικόνα 3.21: Παράμετροι texturing

Η διαδικασία διήρκεσε 1 ώρα και 9 λεπτά και η περάτωση της σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του μοντέλου. Με την ολοκλήρωση του μοντέλου το λογισμικό μπορεί να παράξει τεχνική έκθεση όλης της διαδικασίας. Η τεχνική έκθεση αυτή περιλαμβάνει από τους χρόνους επεξεργασίας μέχρι διαγράμματα ακτινικής διαστροφής (εικόνα 3.22) και πίνακες μεταβλητότητας-συμεταβλητότητας των μεταβλητών των διαστροφών (πίνακας 3.2). Παράλληλα μέσα από το πρόγραμμα μπορεί ο χρήστης να ελέγξει την αυτοβαθμονόμηση της κάμερας (εικόνα 3.23).

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	3662.32	0.487972	1.00	0.02	0.63	-0.98	0.13	0.02	-0.02	0.03	-0.03	0.03	0.02	-0.04	0.03
Cx	20.2817	0.881554		1.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	-0.03	0.03	0.99	0.05	-0.32	0.14
Cy	5.5812	0.411097			1.00	-0.72	0.19	0.05	-0.04	0.05	-0.05	-0.01	0.13	-0.05	0.05
B1	17.2766	0.515867				1.00	-0.14	-0.06	0.05	-0.05	0.05	0.00	-0.02	0.04	-0.04
B2	2.49592	0.183272					1.00	-0.04	0.04	-0.03	0.03	-0.03	0.05	0.01	0.01
K1	0.0206484	7.93194e-05						1.00	-0.96	0.91	-0.85	0.03	0.02	0.05	-0.05
K2	-0.0846836	0.000402639							1.00	-0.98	0.95	0.02	-0.03	-0.06	0.05
K3	0.157066	0.000812605								1.00	-0.99	-0.02	0.03	0.05	-0.05
K4	-0.0967014	0.000558996									1.00	0.03	-0.03	-0.05	0.05
P1	0.0021235	8.07021e-05										1.00	0.05	-0.37	0.19
P2	0.000252047	5.96428e-06											1.00	-0.10	0.09
P3	0.0876384	0.00937214												1.00	-0.95
P4	-0.0146523	0.0102299													1.00

Πίνακας 3.2: Πίνακας μεταβλητότητας-συμεταβλητότητας

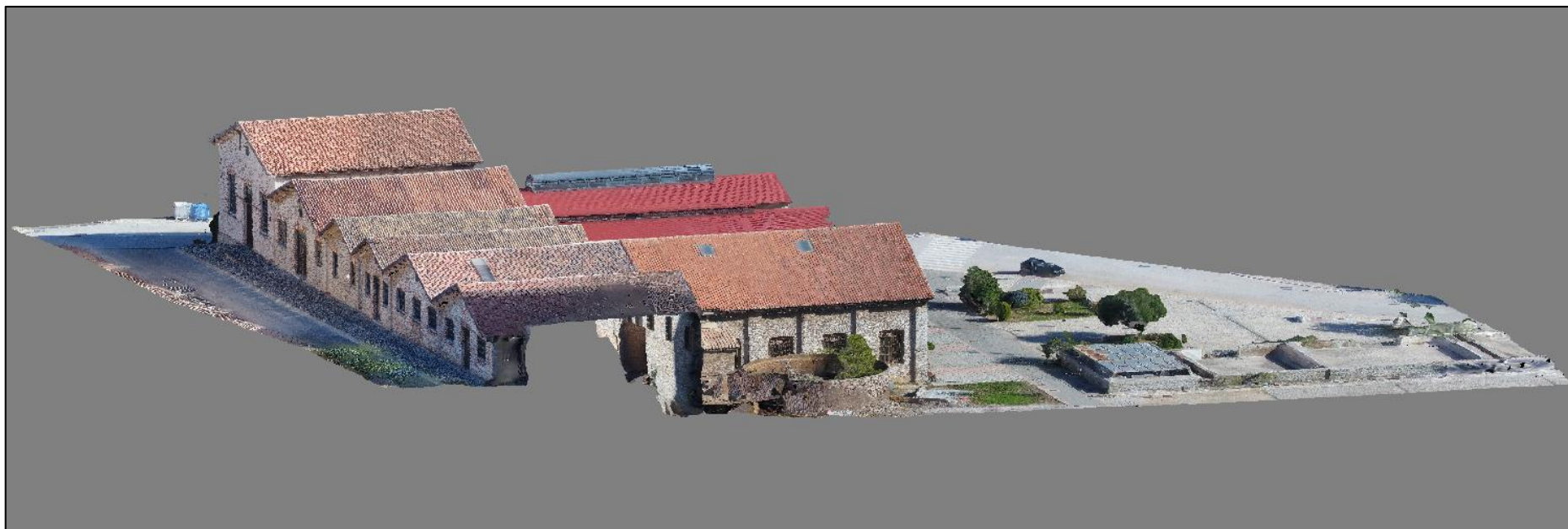


Εικόνα 3.22: Διάγραμμα ακτινικής διαστρώσης

Camera type:	Frame	
Pixel size (mm):	0.00241228	x 0.00241228
Focal length (mm):	8.8	
<input type="button" value="Initial"/> <input type="button" value="Adjusted"/> <input type="button" value="GPS/INS Offset"/>		
f:	3662.32	
cx:	20.2817	b1: 17.2766
cy:	5.5812	b2: 2.49592
k1:	0.0206484	p1: 0.0021235
k2:	-0.0846836	p2: 0.000252047
k3:	0.157066	p3: 0.0876384
k4:	-0.0967014	p4: -0.0146523

Εικόνα 3.23: Αυτοβαθμονόμηση της κάμερας

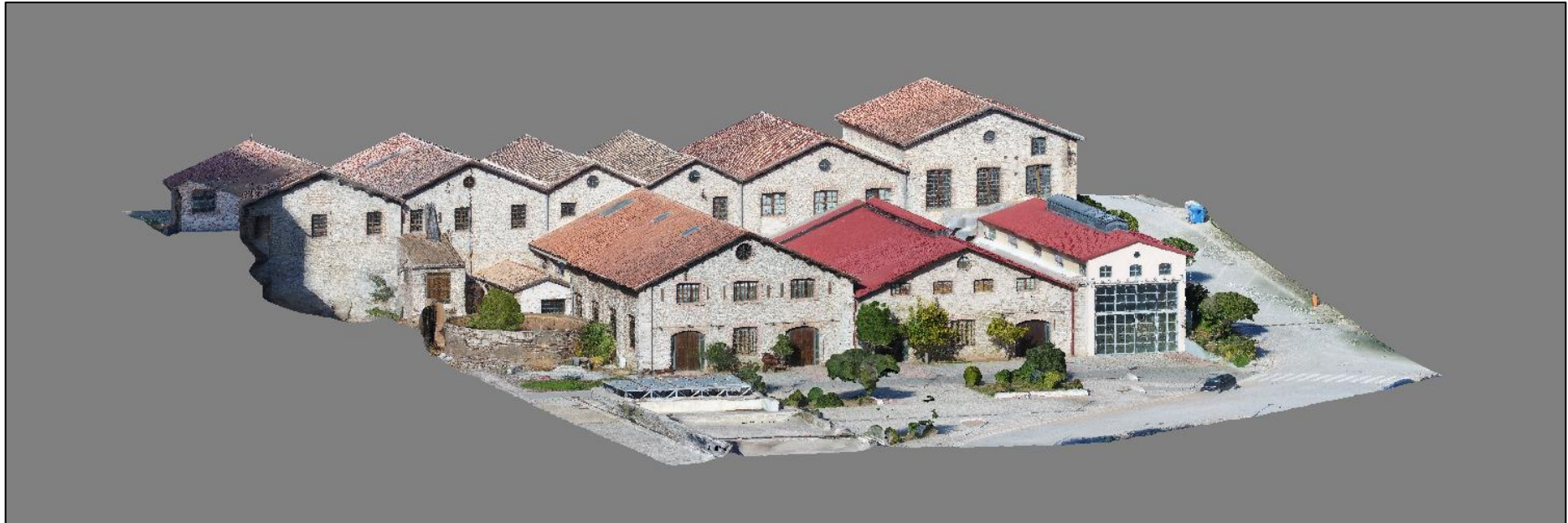
Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι διαθέσιμες όψεις του τελικού τριδιάστατου μοντέλου της περιοχής αποτύπωσης.



Εικόνα 3.24: Δυτική όψη της περιοχής



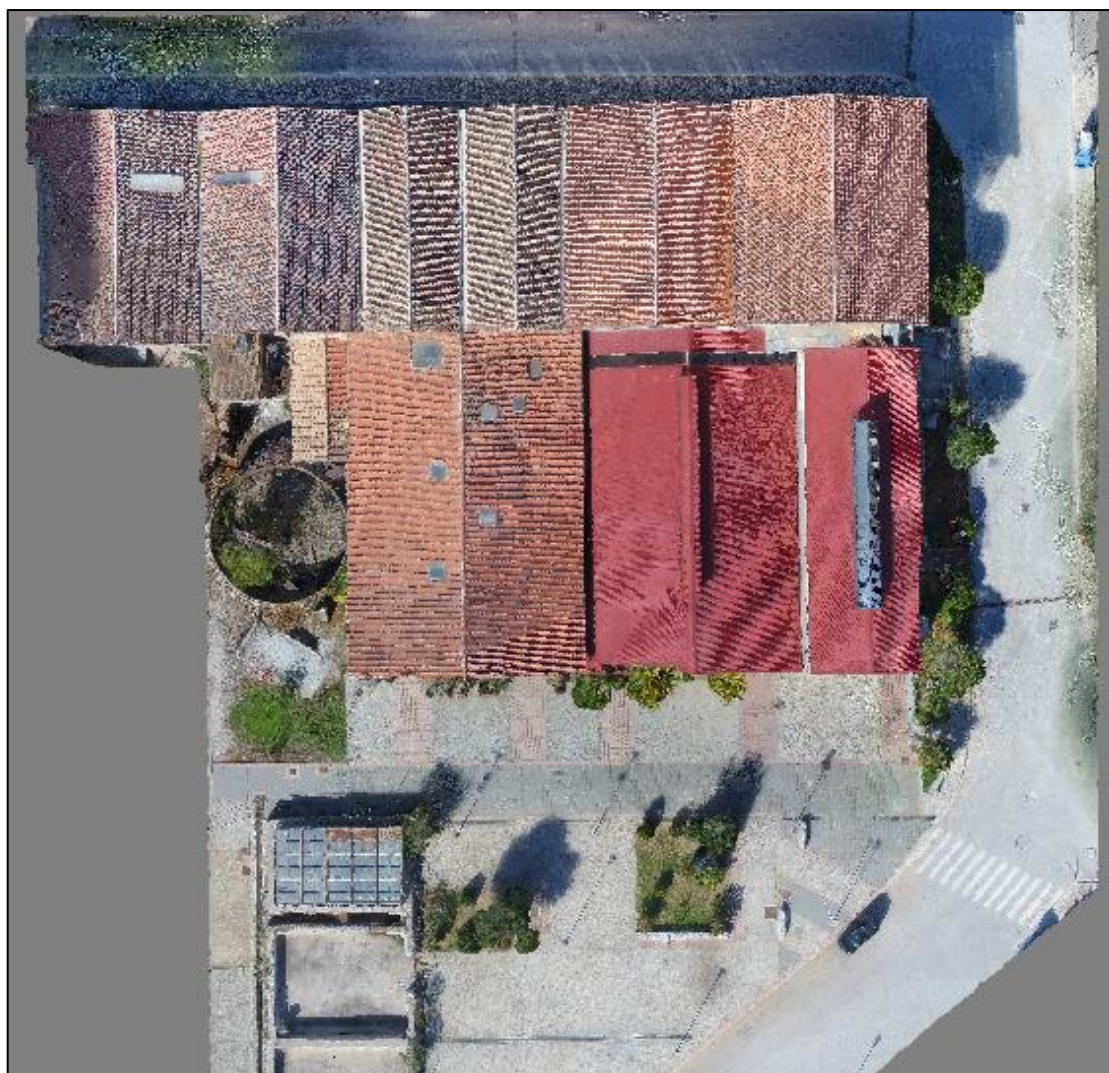
Εικόνα 3.25: Ανατολική όψη της περιοχής



Εικόνα 3.26: Νότια όψη της περιοχής



Εικόνα 3.27: Βόρεια όψη της περιοχής



Εικόνα 3.28: Κάτοψη πάρκου

3.6 Παραγωγή ορθοφωτοχάρτη

Η παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη θα γίνει μόνο με τις 399 ναδιρικές λήψεις. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με την παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου με τη μόνη διαφορά ότι για την παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη δεν απαιτείται η ανακατασκευή της γεωμετρίας (meshing) και οι υφές (texturing). Στο στάδιο αυτό θα παραχθεί και ένα ψηφιακό μοντέλου εδάφους (DEM – Digital Elevation Model) της ευρύτερης περιοχής. [Barry P., 2013], [4]

Για την γεωαναφορά το αραιού νέφους σημείων χρησιμοποιήθηκαν τα 17 φωτοσταθερά που είχαν σημειωθεί σε όλη τη περιοχή (F1-F17). Τα 13 αποτέλεσαν φωτοσταθερά σημεία ενώ τα υπόλοιπα 4 χρησιμοποιήθηκαν σαν σημεία ελέγχου. Στην εικόνα 3.29 παρουσιάζονται τα τελικά σφάλματα των φωτοσταθερών από την παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη.

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> F1	-0.000677	0.001782	0.006336	0.005000	0.006617	20	0.173
<input checked="" type="checkbox"/> F2	0.001211	-0.001931	-0.000827	0.005000	0.002424	19	0.187
<input checked="" type="checkbox"/> F3	-0.008070	0.000590	-0.020444	0.005000	0.021987	9	0.316
<input checked="" type="checkbox"/> F4	0.005788	0.002361	0.006376	0.005000	0.008930	19	0.222
<input checked="" type="checkbox"/> F5	-0.001801	-0.001000	-0.007351	0.005000	0.007634	22	0.248
<input checked="" type="checkbox"/> F6	-0.000996	0.001584	-0.002870	0.005000	0.003426	23	0.158
<input checked="" type="checkbox"/> F7	0.003302	-0.005520	0.004417	0.005000	0.007803	19	0.182
<input checked="" type="checkbox"/> F8	0.001229	-0.000291	0.006007	0.005000	0.006138	34	0.233
<input checked="" type="checkbox"/> F9	-0.000142	0.003043	0.000679	0.005000	0.003121	29	0.226
<input checked="" type="checkbox"/> F10	-0.002253	-0.000093	-0.004658	0.005000	0.005174	28	0.304
<input type="checkbox"/> F11	-0.004034	-0.011097	-0.006226	0.005000	0.013348	23	0.320
<input checked="" type="checkbox"/> F12	0.002651	-0.001992	-0.004358	0.005000	0.005476	27	0.183
<input checked="" type="checkbox"/> F13	-0.001467	0.003764	0.000259	0.005000	0.004048	10	0.192
<input checked="" type="checkbox"/> F14	0.001218	-0.002003	0.015777	0.005000	0.015950	13	0.162
<input type="checkbox"/> F15	0.001530	-0.004940	0.006735	0.005000	0.008491	23	0.213
<input type="checkbox"/> F16	0.005038	-0.007741	0.010827	0.005000	0.014231	16	0.257
<input type="checkbox"/> F17	0.009441	0.003499	-0.001134	0.005000	0.010132	19	0.248
Total Error							
Control points	0.003198	0.002454	0.008355		0.009277		0.220
Check points	0.005769	0.007412	0.007117		0.011784		0.263

Εικόνα 3.29: Σφάλματα ορθοφωτοχάρτη

Οι ακρίβειες στην συγκεκριμένη διαδικασία, παρά το μεγαλύτερο ύψος πτήσης, είναι καλύτερες από την διαδικασία παραγωγής του τριδιάστατου μοντέλου. Αυτό συμβαίνει τόσο λόγω του καλού προσδιορισμού των συντεταγμένων όσο και του καλύτερου προσδιορισμού του κέντρου του φωτοσταθερού.

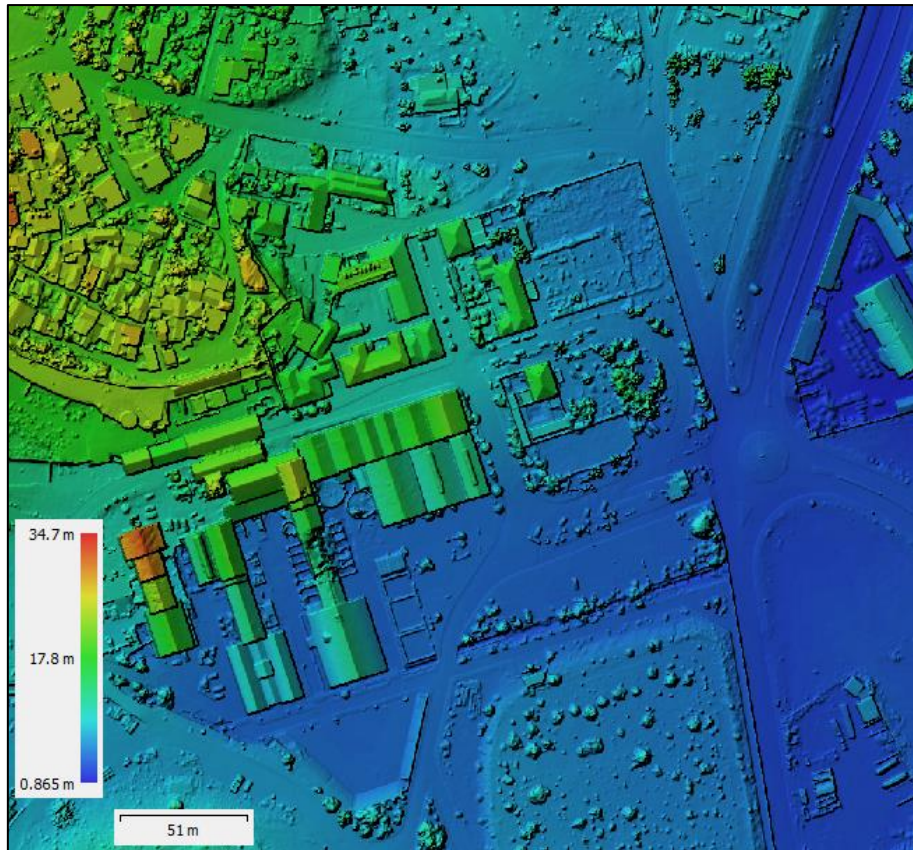
Το συνολικό σφάλμα του μετασχηματισμού είναι ± 9 mm ενώ του μοντέλου ± 1.2 cm χρησιμοποιώντας ως φωτοσταθερά και σημεία ελέγχου τα σημεία που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα. Το RMS σφάλμα επαναπροβολής (reprojection error) διαμορφώθηκε στα 0.263 pixel.

Το πυκνό νέφος σημείων που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει 95 εκατομμύρια σημεία. Η παραγωγή του DEM γίνεται λαμβάνοντας ως πρωτογενή δεδομένα αυτά του πυκνού νέφους σημείων.

Το τελικό παράγωγο (εικόνα 3.30), το οποίο είναι και γεωαναφερμένο, αποτελείται από μια εικόνα με διπλάσιο μέγεθος εδαφοψηφίδας από αυτό του ορθοφωτοχάρτη και διαφοροποίηση χρωματισμών όπου διαφοροποιείται και το υψόμετρο του ανάγλυφου με σχετικό υπόμνημα.

Αφού παραχθεί το DEM μπορεί να γίνει και η δημιουργία του ορθοφωτοχάρτη (εικόνα 3.31) με πρωτογενή δεδομένα αυτά του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Το GSD του DEM είναι 4.33 cm/pixel ενώ του ορθοφωτοχάρτη 2.17 cm/pixel. Ο συνολικός χρόνος παραγωγής του ήταν 12 ώρες παραλείποντας βέβαια στάδια τα οποία δεν ήταν απαραίτητα.



Εικόνα 3.30: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)



Εικόνα 3.31: Ορθοφωτοχάρτης ΤΠΠΑ



Εικόνα 3.32: Οπτικοποίηση σφαλμάτων ορθοφωτοχάρτη

3.7 Έλεγχος

➤ Οπτικός έλεγχος

Οι έλεγχοι οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν για την ορθότητα και την ακρίβεια του μοντέλου είναι οι ίδιοι που ακολουθεί ένας μηχανικός και σε ένα τριδιάστατο τοπογραφικό διάγραμμα.

Σε πρώτη φάση ελέγχθηκε το παράγωγο για κενά σημεία ή παραμορφώσεις σε σημεία που δεν ήταν εμφανή κατευθείαν. Τέτοια σημεία εντοπίστηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις αλλά η παραμόρφωση δεν ήταν σημαντικής λεπτομέρειας για να τεθεί ζήτημα εκ νέου ανακατασκευής. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι θέσεις με τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις υπάρχουν γύρω από το κτίριο το οποίο παρουσίασε προβλήματα και σε προηγούμενο στάδιο της μοντελοποίησης (εικόνα 3.33).



Εικόνα 3.33: Παραμορφώσεις σε στέγη και περιβάλλον

Ο λόγος για τον οποίο το συγκεκριμένο κτίριο παρουσίαζε παραμορφώσεις και ελλείψεις σε κάθε στάδιο είναι γνωστός ως πρόβλημα του διαφράγματος. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται σε περιοχές με

επαναλαμβανόμενα μοτίβα ή περιοχές όπου η ένταση δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος συνταύτισης να μην είναι ικανός να βρει σημεία σύνδεσης. Το ίδιο πρόβλημα εντοπίζεται και σε στέγη διαφορετικού κτιρίου η οποία λόγω της μεταλλικής φύσης της αντανακλά αρκετά και δεν επιτρέπει τον εντοπισμό κοινών σημείων (εικόνα 3.34)



Εικόνα 3.34: Παραμορφώσεις σε στέγη

➤ Αριθμητικός έλεγχος

Σκοπός της εφαρμογής που έγινε είναι να εξαχθούν σημεία ενδιαφέροντος κατευθείαν από το τριδιάστατο μοντέλο για εισαγωγή σε κάποιο άλλο προϊόν σε διαφορετικό λογισμικό επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξακριβωθεί το κατά πόσο ακριβείς είναι οι συντεταγμένες των σημείων αυτών όταν στοχεύονται κατευθείαν στο μοντέλο.

Θα γίνει η χρήση της ανίσωσης 1.13 για 24 σημεία. Αυτά είναι τα 11 τοποσταθερά που χρησιμοποιήθηκαν και επιπλέον 13 σημεία ελέγχου. Στα 6 σημεία ελέγχου που προϋπήρχαν προστέθηκαν άλλα 7 μετά την επεξεργασία των δεδομένων προκειμένου να προκύψει μια καλύτερη εικόνα για τα σφάλματα του μοντέλου.

Τα 24 αυτά σημεία θα στοχευθούν κατευθείαν πάνω στο μοντέλο, στη θέση που θεωρεί ο χρήστης σωστή και θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες τους. Αυτές στη συνέχεια θα ελεγχθούν με τις αντίστοιχες γεωδαιτικές. Ο έλεγχος θα γίνει για τις συντεταγμένες X, Y, H κάθε σημείου

χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα σφάλματα γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά.

Όσον αφορά την γεωδαιτική αποτύπωση, αυτή πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο πολικών συντεταγμένων και την χρήση Reflectorless γεωδαιτικού σταθμού αβεβαιότητας $\pm 15^{\text{cc}}$ στην μέτρηση διευθύνσεων και $\pm 3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ στην μέτρηση μηκών. Με εφαρμογή του νόμου μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις προσδιορισμού των συντεταγμένων, πρόκυψε πως οι αβεβαιότητες των σημείων λεπτομέρειας κατά X κυμαίνονται από $\pm 10\text{mm}$ μέχρι $\pm 25\text{mm}$, κατά Y από $\pm 10\text{mm}$ έως $\pm 28\text{mm}$, ενώ κατά H είναι περίπου $\pm 10\text{mm}$. [Ιωαννίδου Σ.,2018]

a/a	X	Y	Z	σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_H (cm)
313	504274.280	4175012.710	15.922	1.4	1.3	1.0
315	504284.228	4175015.890	16.346	1.4	1.3	1.0
465	504292.141	4175034.544	18.386	1.0	1.0	1.0
507	504290.126	4175036.344	10.737	1.0	1.0	1.0
509	504292.704	4175036.515	10.742	1.0	1.0	1.0
555	504279.699	4175030.625	16.021	1.4	1.5	1.0
573	504269.526	4175027.358	15.957	1.4	1.2	1.0
586	504261.762	4175024.890	15.844	1.4	1.1	1.0
604	504252.371	4175021.845	16.226	1.5	1.2	1.0
650	504267.081	4175035.440	10.698	1.4	1.2	1.0
685	504294.734	4174991.862	12.080	1.2	1.0	1.0
693	504257.133	4175007.279	16.206	2.4	1.2	1.0
703	504266.543	4175010.310	15.824	2.5	1.1	1.0
752	504311.408	4174997.225	10.601	1.2	1.2	1.0
771	504304.297	4175019.013	10.626	1.2	1.2	1.0
811	504307.339	4175020.549	8.481	1.2	1.2	1.0
840	504321.832	4175003.365	5.565	1.3	1.1	1.0
859	504305.988	4175035.913	8.934	1.4	1.2	1.0
994	504313.809	4174989.366	4.560	1.2	1.1	1.0
1026	504271.779	4174984.092	11.102	1.1	1.1	1.0
1030	504276.468	4174985.617	11.060	1.1	1.1	1.0
1035	504281.044	4174987.102	10.081	1.1	1.0	1.0
F2	504301.392	4175045.552	9.666	1.0	1.0	2.0
F16	504286.938	4174979.364	4.529	1.0	1.0	2.0
RMS				1.4	1.2	1.1

Πίνακας 3.3: Σφάλματα γεωδαιτικής αποτύπωσης

Το φωτογραμμετρικό RMS σφάλμα κάθε μεταβλητής υπολογίστηκε με τον ίδιο τρόπο χρησιμοποιώντας μόνο τις υπολογισμένες από το πρόγραμμα αβεβαιότητες των 13 σημείων ελέγχου για να είναι πιο

αντικειμενικό και σωστό το αποτέλεσμα. Οι αβεβαιότητες αυτές είναι η διαφορά τους από τις γεωδαιτικές συντεταγμένες και ο έλεγχος που έγινε πραγματοποιήθηκε με την παραδοχή ότι οι γεωδαιτικές συντεταγμένες των τοποσταθερών και των σημείων ελέγχου δεν περιέχουν σφάλματα. Οι διαφορές αυτές λοιπόν, θεωρούνται τα σφάλματα της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 3.4.

a/a	Γεωδαιτικές			Φωτογραμμετρικές			δx (cm)	δy (cm)	δH (cm)
	X	Y	Z	X	Y	Z			
465	504292.141	4175034.544	18.386	504292.148	4175034.557	18.381	0.7	1.3	-0.5
507	504290.126	4175036.344	10.737	504290.116	4175036.337	10.755	-1.0	-0.7	1.8
509	504292.704	4175036.515	10.742	504292.699	4175036.523	10.744	-0.5	0.8	0.2
573	504269.526	4175027.358	15.957	504269.524	4175027.366	15.966	-0.2	0.8	0.9
586	504261.762	4175024.890	15.844	504261.763	4175024.897	15.847	0.1	0.7	0.3
650	504267.081	4175035.440	10.698	504267.077	4175035.444	10.696	-0.4	0.4	-0.2
771	504304.297	4175019.013	10.626	504304.288	4175019.019	10.633	-0.9	0.6	0.7
840	504321.832	4175003.365	5.565	504321.839	4175003.354	5.559	0.7	-1.1	-0.6
994	504313.809	4174989.366	4.560	504313.814	4174989.363	4.560	0.5	-0.3	0.0
1035	504281.044	4174987.102	10.081	504281.036	4174987.107	10.079	-0.8	0.5	-0.2
1030	504276.468	4174985.617	11.060	504276.462	4174985.633	11.054	-0.6	1.6	-0.6
703	504266.543	4175010.310	15.824	504266.535	4175010.307	15.824	-0.8	-0.3	0.0
313	504274.280	4175012.710	15.922	504274.285	4175012.690	15.909	0.5	-2.0	-1.3
RMS							0.6	0.8	0.7

Πίνακας 3.4: Σφάλματα φωτογραμμετρικής επεξεργασίας σημείων ελέγχου

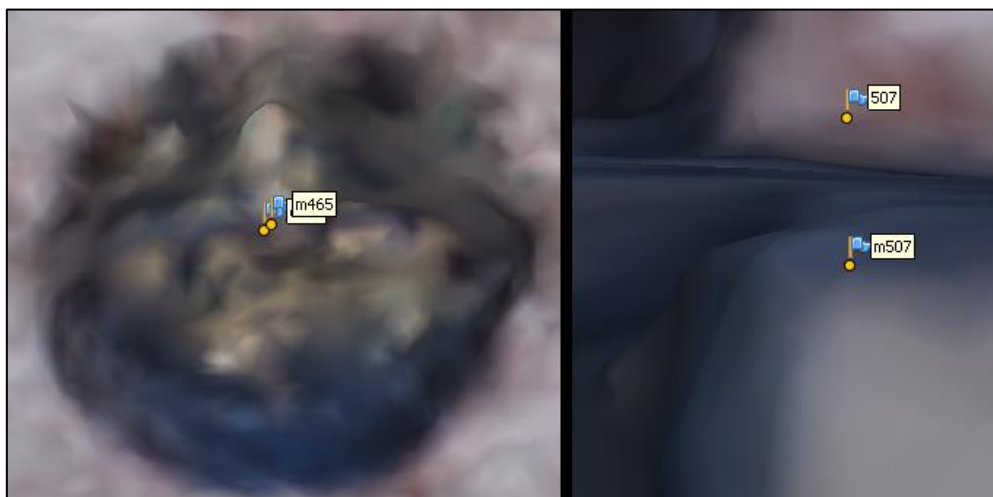
Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι τα σφάλματα της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας δεν θα είναι ίδια σε περίπτωση εκ νέου επεξεργασίας από τον ίδιο ή και διαφορετικό χρήστη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διακριτική ικανότητα του κάθε ανθρώπου διαφέρει και επίσης είναι αδύνατο ένα σημείο να στοχευθεί ακριβώς στην ίδια θέση σε κάθε φωτογραφία.

Έχοντας ως δεδομένα λοιπόν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS από τις δυο εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί μπορεί πλέον να ελεγχθεί η δυνατότητα εξαγωγής συντεταγμένων κατευθείαν από το τριδιάστατο μοντέλο.

Απενεργοποιήθηκαν όλοι οι markers από το πρόγραμμα επεξεργασίας και ξεκίνησε η εκ νέου σκόπευση αυτών πάνω στο μοντέλο. Η διαδικασία ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα αφενός γιατί πρόκειται για ένα πολύ μεγάλο αρχείο και αφετέρου διότι μερικά από τα σημεία που έχουν επιλεγεί βρίσκονται σε θέσεις οι οποίες δεν έχουν ανακατασκευαστεί καλά και

ορθά. Το τελευταίο όχι μόνο έκανε τον εντοπισμό του σημείου ιδιαίτερα δύσκολο αλλά και εσφαλμένο σε αρκετές περιπτώσεις.

Παρόλα αυτά οι θέσεις αυτές είναι συγκεκριμένες και περιορισμένες μέσα στο μοντέλο και οι παραμορφώσεις τους οφείλονται γενικά στην γεωμετρία που έχει εκείνο το σημείο, στην ιδιαίτερη φύση του ίδιου ή και των γειτονικών του χαρακτηριστικών, στην ελλιπή επικάλυψη που μπορεί να είχαν εκεί οι φωτογραφίες και τέλος στην ποιότητα πύκνωσης του dense point cloud. Μερικά από αυτά τα σημεία φαίνονται στη παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.35: Παραμορφώσεις φεγγίτη (αριστερά) και ανακατασκευή επιφάνειας χαμηλότερα από τη πραγματική θέση του τοποσταθερού

Αφού σκοπεύτηκαν όλα τα σημεία στο μοντέλο και προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες τους, έγινε εξαγωγή αυτών και έλεγχος σε κάθε μεταβλητή X, Y, H με βάση την εξίσωση που αναφέρθηκε. Η αποδεκτή απόκλιση για κάθε μεταβλητή διαμορφώθηκε έτσι όπως φαίνεται παρακάτω. Στον πίνακα 3.5 φαίνονται οι αποκλίσεις των σημείων του μοντέλου και αν περνάνε τον έλεγχο ή όχι. Ο έλεγχος πρέπει να ισχύει και για τις τρεις μεταβλητές ειδάλλως το σημείο δεν περνάει τον έλεγχο.

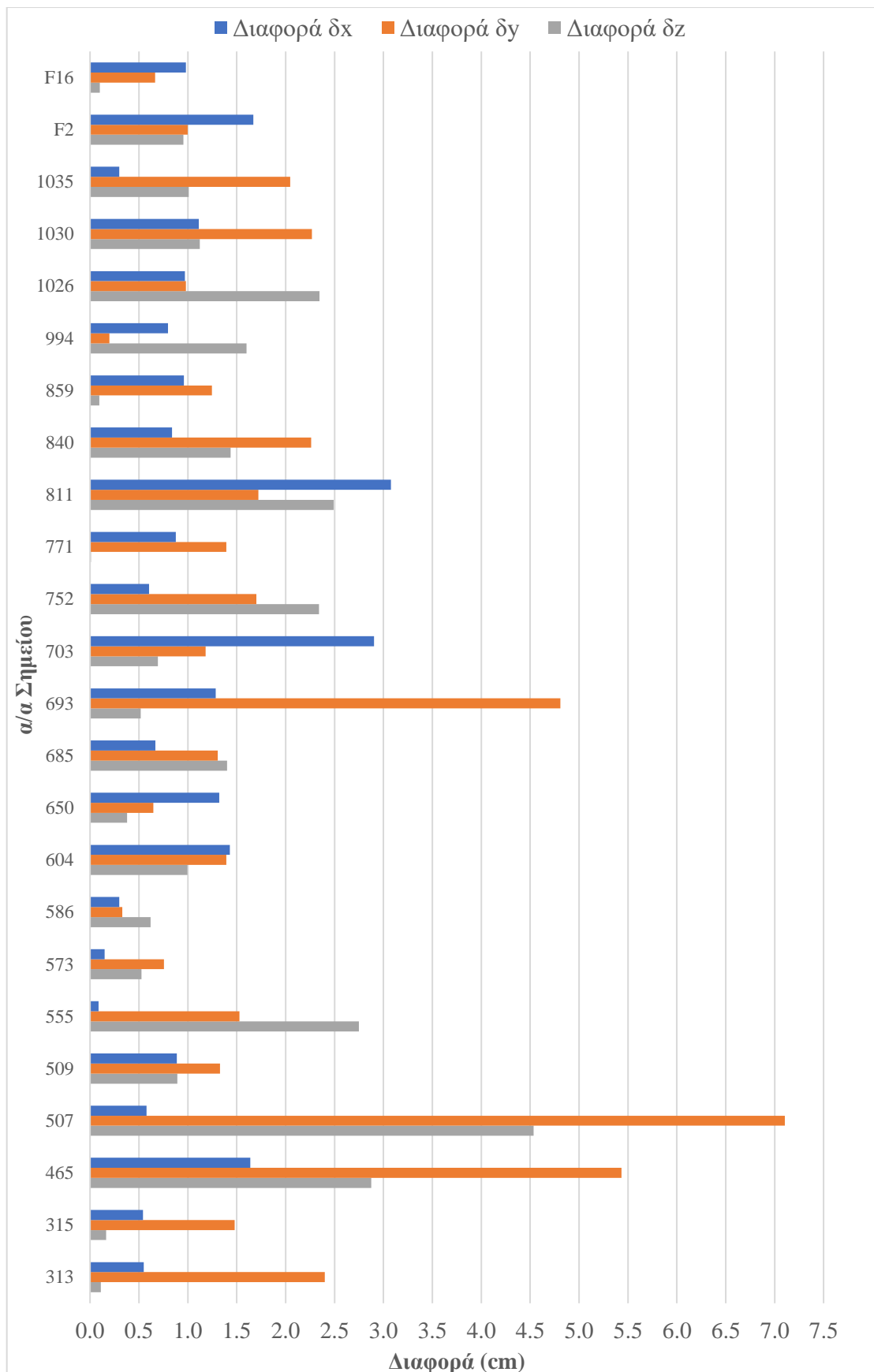
$$1.96 * \sigma_{\Delta x} = 1.96 * \sqrt{\sigma_{X(\gamma\epsilon\omega\delta.)}^2 + \sigma_{X(\phi\omega\tau\omicron\gamma\rho.)}^2} = 1.96 * \sqrt{1.4^2 + 0.6^2} = \pm 3 \text{ cm}$$

$$1.96 * \sigma_{\Delta y} = 1.96 * \sqrt{\sigma_{Y(\gamma\epsilon\omega\delta.)}^2 + \sigma_{Y(\phi\omega\tau\omicron\gamma\rho.)}^2} = 1.96 * \sqrt{1.2^2 + 0.8^2} = \pm 2.7 \text{ cm}$$

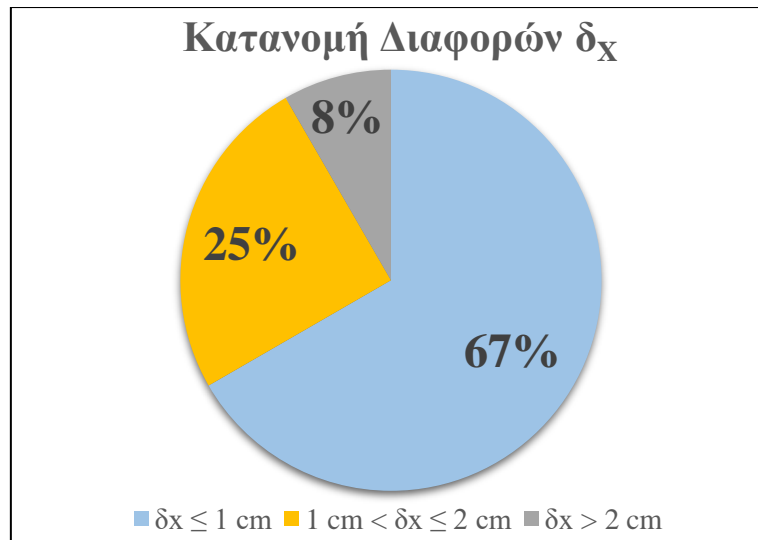
$$1.96 * \sigma_{\Delta z} = 1.96 * \sqrt{\sigma_{H(\gamma\epsilon\omega\delta.)}^2 + \sigma_{H(\phi\omega\tau\omicron\gamma\rho.)}^2} = 1.96 * \sqrt{1.1^2 + 0.7^2} = \pm 2.6 \text{ cm}$$

a/a	Γεωδαιτικές Συντεταγμένες			Συντεταγμένες 3D Model			Διαφορές (cm)			Έλεγχος
313	504274.280	4175012.710	15.922	504274.285	4175012.686	15.921	0.5	-2.4	-0.1	ΙΣΧΥΕΙ
315	504284.228	4175015.890	16.346	504284.223	4175015.875	16.344	-0.5	-1.5	-0.2	ΙΣΧΥΕΙ
465	504292.141	4175034.544	18.386	504292.125	4175034.598	18.415	-1.6	5.4	2.9	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
507	504290.126	4175036.344	10.737	504290.132	4175036.273	10.692	0.6	-7.1	-4.5	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
509	504292.704	4175036.515	10.742	504292.713	4175036.528	10.733	0.9	1.3	-0.9	ΙΣΧΥΕΙ
555	504279.699	4175030.625	16.021	504279.698	4175030.640	16.048	-0.1	1.5	2.7	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
573	504269.526	4175027.358	15.957	504269.525	4175027.366	15.962	-0.1	0.8	0.5	ΙΣΧΥΕΙ
586	504261.762	4175024.890	15.844	504261.765	4175024.893	15.838	0.3	0.3	-0.6	ΙΣΧΥΕΙ
604	504252.371	4175021.845	16.226	504252.385	4175021.831	16.216	1.4	-1.4	-1.0	ΙΣΧΥΕΙ
650	504267.081	4175035.440	10.698	504267.094	4175035.434	10.694	1.3	-0.6	-0.4	ΙΣΧΥΕΙ
685	504294.734	4174991.862	12.080	504294.741	4174991.875	12.066	0.7	1.3	-1.4	ΙΣΧΥΕΙ
693	504257.133	4175007.279	16.206	504257.146	4175007.231	16.201	1.3	-4.8	-0.5	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
703	504266.543	4175010.310	15.824	504266.514	4175010.298	15.817	-2.9	-1.2	-0.7	ΙΣΧΥΕΙ
752	504311.408	4174997.225	10.601	504311.414	4174997.208	10.624	0.6	-1.7	2.3	ΙΣΧΥΕΙ
771	504304.297	4175019.013	10.626	504304.306	4175019.027	10.626	0.9	1.4	0.0	ΙΣΧΥΕΙ
811	504307.339	4175020.549	8.481	504307.308	4175020.566	8.456	-3.1	1.7	-2.5	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
840	504321.832	4175003.365	5.565	504321.840	4175003.342	5.551	0.8	-2.3	-1.4	ΙΣΧΥΕΙ
859	504305.988	4175035.913	8.934	504305.998	4175035.901	8.935	1.0	-1.2	0.1	ΙΣΧΥΕΙ
994	504313.809	4174989.366	4.560	504313.801	4174989.368	4.544	-0.8	0.2	-1.6	ΙΣΧΥΕΙ
1026	504271.779	4174984.092	11.102	504271.789	4174984.102	11.079	1.0	1.0	-2.3	ΙΣΧΥΕΙ
1030	504276.468	4174985.617	11.060	504276.479	4174985.640	11.049	1.1	2.3	-1.1	ΙΣΧΥΕΙ
1035	504281.044	4174987.102	10.081	504281.047	4174987.122	10.071	0.3	2.0	-1.0	ΙΣΧΥΕΙ
F2	504301.392	4175045.552	9.666	504301.409	4175045.542	9.656	1.7	-1.0	-1.0	ΙΣΧΥΕΙ
F16	504286.938	4174979.364	4.529	504286.928	4174979.371	4.528	-1.0	0.7	-0.1	ΙΣΧΥΕΙ

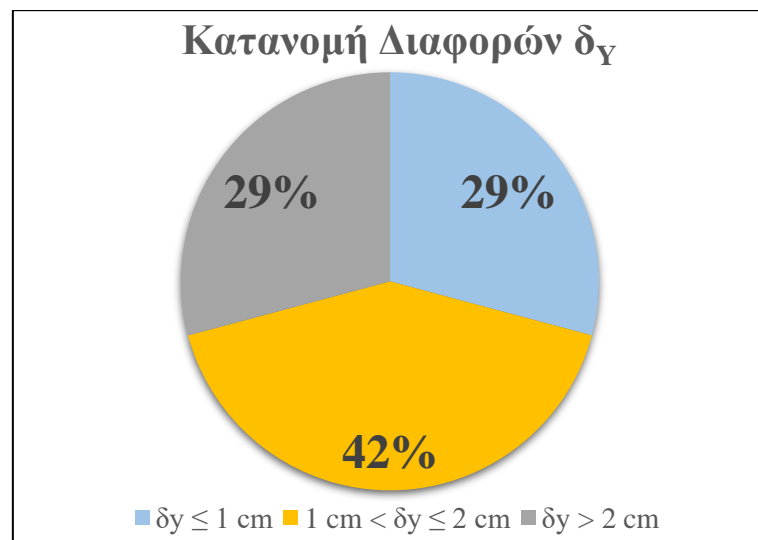
Πίνακας 3.5: Έλεγχος αποκλίσεων των σημείων



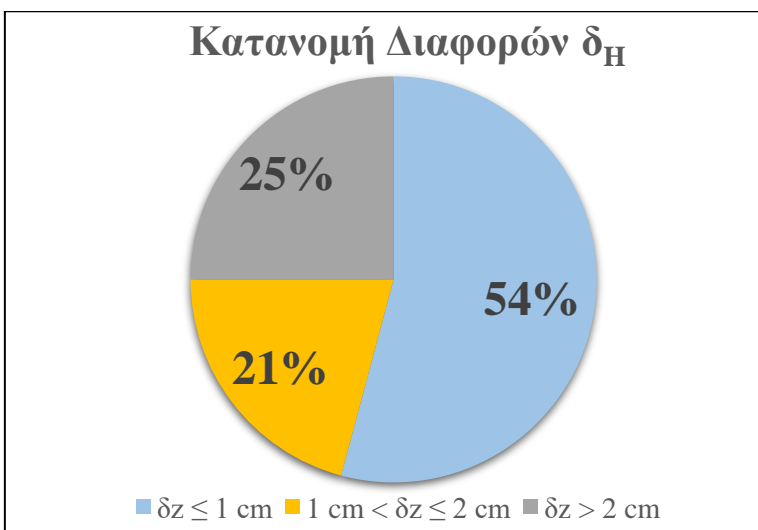
Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα διαφορών συντεταγμένων 3D μοντέλου



Διάγραμμα 3.3: Κατανομή διαφορών δ_x



Διάγραμμα 3.4: Κατανομή διαφορών δ_y



Διάγραμμα 3.5: Κατανομή διαφορών δ_H

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.5, 19 από τα 24 σημεία περνάνε τον έλεγχο. Η μέγιστη απόκλιση οριζοντιογραφικά είναι 7.1 cm και υψομετρικά 4.5 cm. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στα σημεία που φαίνονται και στην εικόνα 3.31 παραπάνω. Ταυτόχρονα υπάρχουν σημεία τα οποία περνάνε οριακά τον έλεγχο που εφαρμόστηκε.

Στα διαγράμματα 3.3, 3.4, 3.5 παρουσιάζονται τα ποσοστά των σημείων που εντοπίζονται σε κάθε δεδομένη κατηγορία απόκλισης. Η κατηγοριοποίηση έγινε για απόκλιση μικρότερη του 1 cm, μεγαλύτερη του 1 cm και μικρότερη των 2cm και μεγαλύτερη των 2cm.

Στο πίνακα 3.6 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές, τα RMSE και οι ακρίβειες για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% του πίνακα 3.5. [15]

	δ_x	δ_y	δ_H
Μέση τιμή (cm)	1.0	1.9	1.1
RMSE	1.3	2.5	1.7
Ακρίβεια 95%	2.5	4.9	3.3

Πίνακας 3.6: Στοιχεία αποκλίσεων 3D μοντέλου

Από τα σημεία που δεν περνάνε τον έλεγχο, τρία από αυτά είναι τοποσταθερά (555, 693, 811) και δυο σημεία ελέγχου (465, 507). Από αυτά τα πέντε σημεία τα τρία αποτελούν το κέντρο ενός ξύλινου σταυρού σε φεγγίτη και τα υπόλοιπα δύο λεπτομέρειες σε εξωτερικές κατασκευές σκάλας.

Οι μεν φεγγίτες λόγω της κακής ανακατασκευής των επιφανειών έκαναν αδύνατο τον ακριβή προσδιορισμό του ζητουμένου κέντρου και όπου αυτός ήταν εφικτός η επιφάνεια που δημιουργήθηκε δεν ήταν επαπτόμενη στο αρχικό σημείο. Οι δε εξωτερικές λεπτομέρειες, ενώ ήταν ευδιάκριτες ώστε να προσδιοριστεί η θέση ενδιαφέροντος, η επιφάνεια πάνω στην οποία στοχεύθηκε το σημείο δεν εφάπτοταν στη θέση του αρχικού.

Τα σημεία με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις, που περνάνε τον έλεγχο όμως, είναι οι φεγγίτες ενώ ακολουθούν σημεία των οποίων οι θέσεις δεν μπορούσαν να προσδιοριστούν εξ' αρχής με ακρίβεια πάνω στις φωτογραφίες για σκόπευση. Ο λόγος για τις έντονες παραμορφώσεις στους φεγγίτες είναι ότι οι περισσότεροι διαθέτουν παράθυρο γύρο από το ξύλινο σταυρό που ανήκει το σημείο. Ως εκ τούτου δεν βρέθηκαν αρκετά σημεία σύνδεσης σε εκείνη την περιοχή για να γίνει μια ικανοποιητική τύκνωση σημείων και επακολούθως μια σωστή κατασκευή επιφανειών.

Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει ότι η εξαγωγή συντεταγμένων με σημεία που σκοπεύτηκαν κατευθείαν πάνω στο μοντέλο είναι λάθος. Είναι μια καλή και γρήγορη λύση για ορισμένα σημεία παρόλα αυτά και όχι όλα.

Θέσεις οι οποίες παρουσιάζουν μια ομοιογενή και ακριβή ανακατασκευή επιφανειών είναι κατάλληλες για άμεση εξαγωγή πληροφορίας. Οι θέσεις αυτές αφορούν κυρίως επιφάνειες οι οποίες δεν παρουσίασαν πρόβλημα σε κανένα στάδιο της παραγωγής του μοντέλου. Επιφάνειες χωρίς έντονες γεωμετρικές διαφοροποιήσεις, επαρκή τύκνωση σημείων και καλή δημιουργία τριγώνων κρίνονται κατάλληλες.

Για τις υπόλοιπες λεπτομέρειες που δεν ανήκουν στις επιφάνειες που αναφέρθηκαν παραπάνω κρίνεται σκόπιμο να στοχευθούν σε μερικές φωτογραφίες οι ζητούμενες θέσεις ώστε να διορθωθούν οι συντεταγμένες φωτογραμμετρικά πλέον.

Τα 24 σημεία του πίνακα 3.4 στοχεύθηκαν και στις φωτογραφίες προκειμένου να εντοπιστούν οι αποκλίσεις τους ξανά από τις γεωδαιτικές συντεταγμένες. Τα αποτελέσματα τους φαίνονται στο πίνακα 3.6. Όπως φαίνεται από το πίνακα 3.8, εάν εφαρμοστεί ο προηγούμενος έλεγχος όλα τα σημεία τον περνάνε ικανοποιητικά. Η μεγαλύτερη διαφορά οριζοντιογραφικά είναι 2 cm και υψομετρικά 1.8 cm.

Στον πίνακα 3.7 φαίνονται οι μέσες τιμές, τα RMSE και οι ακρίβειες για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% του πίνακα 3.8.

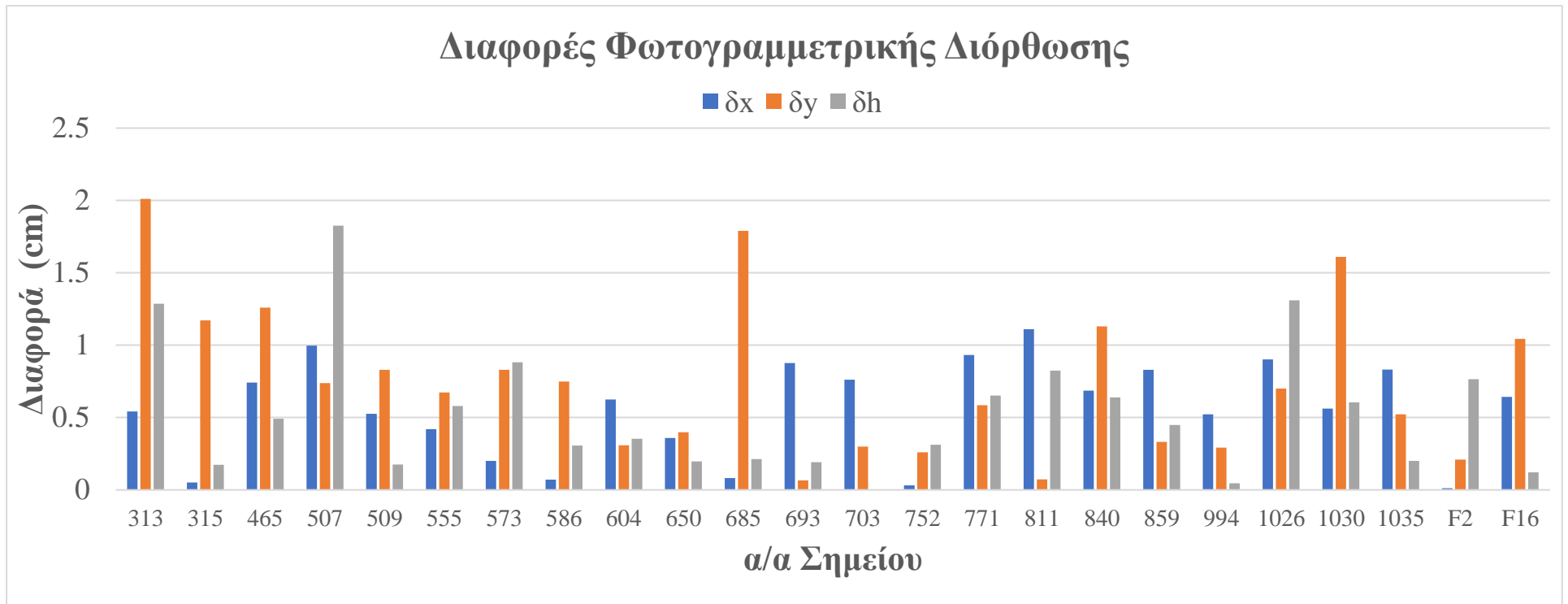
	δx	δy	δh
Μέση τιμή (cm)	0.6	0.7	0.5
RMSE	0.6	0.9	0.7
Ακρίβεια 95%	1.3	1.8	1.3

Πίνακας 3.7: Στοιχεία διαφορών φωτογραμμετρικών δεδομένων

Συνεπώς η πλέον ορθολογική λύση είναι να διορθώνονται οι συντεταγμένες των σημείων, που υπάρχει δυσκολία στο προσδιορισμό της θέσης τους, φωτογραμμετρικά σκοπεύοντας το επιθυμητό σημείο σε κάποιες φωτογραφίες.

α/α	Γεωδαιτικές Συντεταγμένες			Φωτογραμμετρικές Συντεταγμένες			Διαφορές (cm)		
313	504274.280	4175012.710	15.922	504274.285	4175012.690	15.909	0.5	-2.0	-1.3
315	504284.228	4175015.890	16.346	504284.227	4175015.902	16.344	-0.1	1.2	-0.2
465	504292.141	4175034.544	18.386	504292.148	4175034.557	18.381	0.7	1.3	-0.5
507	504290.126	4175036.344	10.737	504290.116	4175036.337	10.755	-1.0	-0.7	1.8
509	504292.704	4175036.515	10.742	504292.699	4175036.523	10.744	-0.5	0.8	0.2
555	504279.699	4175030.625	16.021	504279.703	4175030.618	16.027	0.4	-0.7	0.6
573	504269.526	4175027.358	15.957	504269.524	4175027.366	15.966	-0.2	0.8	0.9
586	504261.762	4175024.890	15.844	504261.763	4175024.897	15.847	0.1	0.7	0.3
604	504252.371	4175021.845	16.226	504252.377	4175021.842	16.230	0.6	-0.3	0.4
650	504267.081	4175035.440	10.698	504267.077	4175035.444	10.696	-0.4	0.4	-0.2
685	504294.734	4174991.862	12.080	504294.733	4174991.880	12.078	-0.1	1.8	-0.2
693	504257.133	4175007.279	16.206	504257.124	4175007.280	16.208	-0.9	0.1	0.2
703	504266.543	4175010.310	15.824	504266.535	4175010.307	15.824	-0.8	-0.3	0.0
752	504311.408	4174997.225	10.601	504311.408	4174997.222	10.604	0.0	-0.3	0.3
771	504304.297	4175019.013	10.626	504304.288	4175019.019	10.633	-0.9	0.6	0.7
811	504307.339	4175020.549	8.481	504307.328	4175020.550	8.489	-1.1	0.1	0.8
840	504321.832	4175003.365	5.565	504321.839	4175003.354	5.559	0.7	-1.1	-0.6
859	504305.988	4175035.913	8.934	504305.996	4175035.910	8.930	0.8	-0.3	-0.4
994	504313.809	4174989.366	4.560	504313.814	4174989.363	4.560	0.5	-0.3	0.0
1026	504271.779	4174984.092	11.102	504271.788	4174984.085	11.089	0.9	-0.7	-1.3
1030	504276.468	4174985.617	11.060	504276.462	4174985.633	11.054	-0.6	1.6	-0.6
1035	504281.044	4174987.102	10.081	504281.036	4174987.107	10.079	-0.8	0.5	-0.2
F2	504301.392	4175045.552	9.666	504301.392	4175045.554	9.658	0.0	0.2	-0.8
F16	504286.938	4174979.364	4.529	504286.931	4174979.354	4.530	-0.6	-1.0	0.1

Πίνακας 3.8: Αποκλίσεις γεωδαιτικών και φωτογραμμετρικών συντεταγμένων



Διάγραμμα 3.6: Διάγραμμα διαφορών συντεταγμένων φωτογραφιών

3.8 Προβλήματα

Τα προβλήματα και οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν οδήγησαν αρκετές φορές στην αναθεώρηση των εκτελούμενων διαδικασιών και ροών εργασίας. Περισσότερα προβλήματα συναντήθηκαν στην διάρκεια των εργασιών γραφείου παρά στον χώρο πεδίου.

Όσον αφορά κάποιες δυσκολίες στο ύπαιθρο, την ημέρα που έγινε η συλλογή των δεδομένων στο ΤΠΠΛ (13/12/2017) φυσούσε αρκετά. Οι απότομες ριπές αέρα μπορεί να διαταράξουν τη σταθερή πορεία πτήσης του ιπτάμενου οχήματος με αποτέλεσμα αφενός να υπάρξει κάποια παραμόρφωση ή θολούρα στις φωτογραφίες και αφετέρου υπάρχει η πιθανότητα ενσωμάτωσης λανθασμένων συντεταγμένων στην εικόνα.

Αυτά θα συντελέσουν σε μια χειρότερη από την ιδανική συνταύτιση σημείων και ακολούθως σε μία λιγότερο ακριβή βελτιστοποίηση των θέσεων των καμερών στο χώρο. Αυτό όμως δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η ακρίβεια του μοντέλου θα μειωθεί.

Ο λόγος που αναφέρεται είναι διότι ίσως επηρεάσει τον εμφανισιακό παράγοντα ο οποίος είναι σημαντικός από τη στιγμή που γίνεται λόγος για τριδιάστατο μοντέλο. Τελικά δεν παρουσιάστηκε κανένα πρόβλημα όσον αφορά την ποιότητα των πρωτογενών δεδομένων.

Τα περισσότερα προβλήματα εντοπίστηκαν στο στάδιο της επεξεργασίας και παραγωγής του τελικού μοντέλου. Αυτά πηγάζουν κυρίως από τη περιορισμένη υπολογιστική ισχύ που είχε διαθέσιμη ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία.

Ο τομέας του computer vision απαιτεί γενικά μεγάλη επεξεργαστική και υπολογιστική ισχύ και όπως μπορεί να έχει γίνει κατανοητό μέχρι τώρα η μέθοδος του SfM είναι κομμάτι του τομέα αυτού.

Πραγματοποιήθηκαν πολλές προσπάθειες και πολλές διαφορετικές παραλλαγές μεταβλητών προκειμένου να γίνει αντιληπτό το πρόβλημα. Οι πρώτες προσπάθειες εστίαζαν στη δημιουργία του μοντέλου από όλες τις διαθέσιμες λήψεις.

Η πρώτη δυσκολία που παρουσιάστηκε είναι ότι κατά τη πύκνωση σημείων η διαδικασία είχε ολοκληρωθεί κατά 30% μετά από 20 ώρες συνεχούς επεξεργασίας. Αυτό συνέβη τόσο λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του συστήματος όσο και λόγω του υπερβολικά μεγάλου αριθμού φωτογραφιών, πολλές από τις οποίες είχαν και κοινές θεάσεις και μεγάλες επικαλύψεις.

Αποφασίστηκε να επεξεργαστούν σε δυο chunks ξεχωριστά οι πλάγιες λήψεις από τις ναδιρικές. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν πέτυχε καθώς τα chunks δεν ευθυγραμμίζονταν καλά με αποτέλεσμα να δημιουργούν παραμορφώσεις.

Κατόπιν έγινε προσπάθεια μείωσης των ναδιρικών λήψεων κρατώντας μόνο όσες είχαν θεάσεις με τις στέγες του πάρκου. Η προσέγγιση αυτή ωστόσο δεν ήταν επιθυμητή καθώς στις συγκεκριμένες ναδιρικές λήψεις όχι μόνο δεν φαίνονταν καθόλου τα τοποσταθερά των επιφανειών αλλά δεν φαίνονταν και αρκετά φωτοσταθερά εδάφους προκειμένου να γίνει σωστή και επαρκής στόχευση.

Η λύση που απέμεινε ήταν να γίνει η παραγωγή του μοντέλου μόνο με τις πλάγιες λήψεις. Ο τρόπος αυτός παρόλο που επαρκούσε για την δημιουργία του μοντέλου, αφού υπήρχε όλη η απαραίτητη λεπτομέρεια σε αυτές τις λήψεις, ήταν και αυτός εξαιρετικά χρονοβόρος με το στάδιο της πύκνωσης να υπολογίζεται από το λογισμικό ότι θα ολοκληρωθεί σε 3 μέρες εξαιτίας πάλι των μεγάλων επικαλύψεων.

Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην προσεκτική διαλογή των πλάγιων φωτογραφικών λήψεων και στην επιλογή των πλέον απαραίτητων. Επιλέχθηκαν τελικά όπως αναφέρθηκε 185 φωτογραφίες με σωστές επικαλύψεις και θεάσεις οι οποίες οδήγησαν τελικά στο επιθυμητό αποτέλεσμα μετά από επίλυση κι άλλων προβλημάτων που προέκυψαν καθώς ως τριδιάστατο μοντέλο νοείται ένα αντικείμενο το οποίο αποτελείται από επιφάνειες.

Όμως οι επιφάνειες που υπολόγιζε το λογισμικό όταν υπήρχαν 48 εκατομμύρια σημεία ήταν πάρα πολλές και το υπολογιστικό σύστημα δεν επαρκούσε για τη δημιουργία τους. Αυτό οδήγησε στη διαγραφή κάποιων μη απαραίτητων χώρων στο πυκνό νέφος σημείων προκειμένου να καταστεί δυνατή η δημιουργία των τριγώνων ανάμεσα στα σημεία και η παραγωγή των επιθυμητών επιφανειών.

Επιπροσθέτως πρέπει να σημειωθούν τα εξής:

- Περιοχές με έντονη και πυκνή βλάστηση παρουσιάζουν δυσκολίες και καθυστερήσεις στο στάδιο της πύκνωσης σημείων. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δέντρα και τα φυτά έχουν περίεργη γεωμετρία. Οι λύσεις σε αυτό το πρόβλημα είναι είτε η παραγωγή κατώτερης ποιότητας dense cloud είτε πιο έντονη γενίκευση επ' αυτού.
- Επιφάνειες με υψηλή ανακλαστικότητα (τζαμαρίες, μεταλλικές στέγες κ.α.) δεν μπορούν να ανακατασκευαστούν με επιτυχία και παρουσιάζουν συχνά παραμορφώσεις.
- Επιφάνειες χωρίς έντονη υφή ή έστω διαφοροποιήσεις επ' αυτής παρουσιάζουν κενά σημεία στη πύκνωση σημείων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αλγόριθμος της συνταύτισης έτσι όπως λειτουργεί δεν μπορεί να βρει πολλά σημεία σύνδεσης για αυτές τις επιφάνειες ανάμεσα στις φωτογραφίες. Η δυσκολία αυτή είναι γνωστή και σαν πρόβλημα του διαφράγματος.

- Στο πυκνό νέφος σημείων πρέπει να διαγράφονται τα σημεία που έχουν παραχθεί και τοποθετηθεί λανθασμένα καθώς θα οδηγήσουν σε παραμορφώσεις στο τελικό μοντέλο ή σε επιφάνειες που δεν θα έπρεπε να υπάρχουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η δημιουργία ενός τριδιάστατου τοπογραφικού διαγράμματος με χρήση συστήματος μη επανδρωμένου αεροσκάφους και η σύγκριση αυτού με το ίδιο διάγραμμα που παράχθηκε με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους. Η εφαρμογή έγινε στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου σε ένα από τα κτιριακά συγκροτήματα της περιοχής.

Η εναέρια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή των συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών, γνωστά και ως drone. Πρόκειται για μια πλατφόρμα ιπτάμενων μέσων η οποία λειτουργεί αυτόνομα ή και με παρέμβαση του χρήστη. Η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε σε αυτές τις πλατφόρμες να είναι οικονομικά προσιτές αλλά ταυτόχρονα να πληρούν και όλες τις προδιαγραφές για τις εργασίες ενός μηχανικού.

Το λογισμικό επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε γι' αυτή την εργασία είναι το Agisoft Photoscan Pro το οποίο είναι μεν πιο χρονοβόρο από άλλα παρόμοια λογισμικά αλλά έχει καλύτερα βελτιστοποιημένους αλγορίθμους σε κάθε δεδομένο στάδιο επεξεργασίας. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα επεξεργασίας, είναι εύκολο στη χρήση με απλό περιβάλλον εργασίας και έχει τη δυνατότητα εξαγωγής των παραγόμενων αρχείων σε πολλές ψηφιακές μορφές.

Ωστόσο, τα προγράμματα που επεξεργάζονται τα φωτογραφικά δεδομένα με αυτή την προσέγγιση απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και χρόνο για να ολοκληρώσουν τις εργασίες τους.

Είναι δύο παράγοντες πολύ βασικοί για την παραγωγή τριδιάστατων μοντέλων και η ανεπάρκεια ή η μη ευχέρεια αυτών καθιστά τη διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα ακόμα και αδύνατη σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι δύο αυτοί παράγοντες εξαρτώνται αφενός από τις δυνατότητες του δεδομένου υπολογιστικού συστήματος και αφετέρου από την ποσότητα και ποιότητα των λήψεων οι οποίες όσο αυξάνονται αριθμητικά τόσο αυξάνεται και ο χρόνος επεξεργασίας, εκθετικά παρόλα αυτά.

Για μια τέτοια εφαρμογή πρέπει να πληρούνται επίσης κάποιες βασικές προϋποθέσεις οι οποίες αφορούν κυρίως τις συνθήκες στις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί μια πτήση UAV.

Αρχικά, πριν την πτήση ο χειριστής οφείλει να ελέγξει τη δυνατότητα πτήσης στην περιοχή που θα πραγματοποιηθεί αυτή. Εάν αυτή είναι εφικτή τότε πρέπει να ακολουθεί όλες τις κείμενες νομοθετικές διατάξεις και ο

χειριστής οφείλει να διαθέτει δίπλωμα για την αντίστοιχη κατηγορία που ανήκει το όχημα του, να το έχει ασφαλισμένο και να τηρεί ρητά όλους τους κανόνες και περιορισμούς που διέπουν αυτές τις πτήσεις.

Παράλληλα πρέπει να γίνει σωστή και προσεκτική επιλογή μέρας και ώρας για την πτήση. Οι δυνατοί άνεμοι καθιστούν την πτήση ασταθή και σε πολύ δυνατούς ανέμους απαγορευτική καθώς μπορεί να προκληθεί βλάβη τόσο στο όχημα όσο και σε κάποιον τρίτο από ανεξέλεγκτη πορεία. Οι βέλτιστες συνθήκες πτήσης είναι οι ελαφρά συννεφιασμένες μέρες στις οποίες ο ήλιος διαχέεται και δημιουργεί μια ομοιόμορφη πηγή φωτεινότητας.

Σε περίπτωση ηλιοφάνειας, οι βέλτιστες ώρες για την λήψη των φωτογραφιών είναι οι ώρες εκείνες που οι σκιές των φυσικών αντικειμένων ελαχιστοποιούνται, δηλαδή το μεσημέρι. Οι έντονες σκιές γενικά δημιουργούν τόσο παραμορφώσεις όσο και δυσκολία στους αλγόριθμους που εντοπίζουν σημεία σύνδεσης.

Σημαντικό στάδιο κάθε τέτοιας εφαρμογής στην οποία απαιτείται γεωαναφορά είναι η επιλογή των θέσεων των φωτοσταθερών όπως επίσης η σήμανση και μέτρηση αυτών. Η κατανομή τους πρέπει να γίνεται ορθά και ομοιόμορφα στην περιοχή μελέτης και πρέπει να υπάρχει και πρόβλεψη για ίδρυση και σημείων ελέγχου.

Ιδρύθηκαν 17 σημεία ως φωτοσταθερά εδάφους προκαθορισμένου και σταθερού σχήματος. Το μέγεθος τους στις φωτογραφίες κατά το στάδιο επεξεργασίας κρίθηκε επαρκές οπότε δεν δημιουργήθηκαν προβλήματα στην αναγνώριση τους σε αυτές. Γενικά πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψιν το μέγεθος της εδαφοψηφίδας κατά τη σήμανση των φωτοσταθερών, γνωρίζοντας εκ των προτέρων το ύψος πτήσης και τα χαρακτηριστικά της κάμερας.

Ως φωτοσταθερά για το τριδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν θέσεις πάνω στις επιφάνειες των κτιρίων. Οι θέσεις αυτές είναι εξωτερικές λεπτομέρειες πάνω στους τοίχους κυρίως, αποτελούν στην ουσία τοποσταθερά, και οι συντεταγμένες τους ήταν ήδη γνωστές λόγω της γεωδαιτικής αποτύπωσης που είχε πραγματοποιηθεί για την παραγωγή του μοντέλου με το οποίο θα συγκρινόταν το παράγωγο αυτής της εφαρμογής. Επιλέχθηκαν 17 τέτοια σημεία γύρω από όλο το κτιριακό συγκρότημα από τα οποία 11 χρησιμοποιήθηκαν ως τοποσταθερά και 6 ως σημεία ελέγχου.

Διαπιστώθηκε ότι η προσέγγιση αυτή δεν ήταν η ιδανική καθώς παρουσιάστηκαν τα εξής προβλήματα:

- Η ακριβής θέση του σημείου που μετρήθηκε γεωδαιτικά ήταν αδύνατο να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Σε αντίθεση με τα φωτοσταθερά εδάφους δεν υπήρχε συγκεκριμένη γεωμετρία ή σχήμα τοποσταθερού. Εξαιτίας αυτού, ήταν και περιορισμένες οι θέσεις οι οποίες θα μπορούσαν

να χρησιμοποιηθούν παρόλο που η γεωδαιτική αποτύπωση αποτελούταν από σχεδόν χίλια σημεία.

- Τα τοποσταθερά αυτά ήταν σχετικά κοντά μεταξύ τους, ο εντοπισμός τους γινόταν σε πάρα πολλές φωτογραφίες με αποτέλεσμα η σκόπευση τους να αποτελέσει μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία.

Τέλος, όσον αφορά τα τοποσταθερά του μοντέλου, το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν σημεία της γεωδαιτικής αποτύπωσης αναπόφευκτα οδήγησε στο να εξαρτάται το φωτογραμμετρικό μοντέλο από τα σφάλματα προσδιορισμού συντεταγμένων του γεωδαιτικού μοντέλου Γι' αυτό το λόγο, στο στάδιο του ελέγχου, αυτός έγινε με την παραδοχή ότι τα σφάλματα προσδιορισμού των μετρημένων επίγεια σημείων είναι μηδενικά οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.

Το πρόγραμμα του προγραμματισμού πτήσης δεν μπορεί να βοηθήσει ιδιαίτερα στις χειροκίνητες πτήσεις που μπορεί να απαιτούνται για την φωτογράφιση των όψεων ενός κτιρίου οπότε εκεί απαιτείται εμπειρία και προσοχή από το χρήστη για να τηρούνται σωστές κατά πλάτος επικαλύψεις.

Στην εφαρμογή που έγινε στο Λαύριο, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές πτήσεις. Έγιναν δυο προγραμματισμένες πτήσεις, με διαφορετικό προσανατολισμό, στα 90 μέτρα υψόμετρο για την απόκτηση των ναδιρικών λήψεων, μια κυκλική προγραμματισμένη στα 50 μέτρα και τέλος μια χειροκίνητη πτήση σε μεταβλητό υψόμετρο για την λήψη των όψεων των κτισμάτων.

Ελήφθησαν συνολικά 693 φωτογραφίες καλύπτοντας περίπου 140 στρέμματα έκτασης. Τα δεδομένα των δυο ναδιρικών λήψεων χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη ενώ των άλλων δυο για την δημιουργία του τριδιάστατου μοντέλου.

Η παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου έγινε με προσεκτική επιλογή 185 φωτογραφιών από τις πλάγιες λήψεις. Ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας και παραγωγής του μοντέλου ήταν 14 ώρες και η ακρίβεια αυτού οριζοντιογραφικά διαμορφώθηκε στα ± 7 mm κατά X και Y ενώ υψομετρικά κατά H στα ± 9 mm.

Για τον έλεγχο του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 24 σημεία των οποίων οι συντεταγμένες γεωδαιτικά ήταν γνωστές και τα ίδια σημεία σκοπεύτηκαν και στο μοντέλο. Για κάθε ένα σημείο πραγματοποιήθηκε έλεγχος των διαφορών των συντεταγμένων του μοντέλου από αυτές που ήταν ήδη υπολογισμένες με επίγειες μεθόδους.

Το επιτρεπόμενο όριο για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ήταν 3 cm κατά X, 2.7 cm κατά Y και 2.6 cm κατά Z.

Από τα σημεία που ελέγχθηκαν 19 πέρασαν τον έλεγχο. Η μέγιστη απόκλιση που εντοπίστηκε στα 24 σημεία, οριζοντιογραφικά ήταν 7.1 cm

και υψομετρικά 4.5 cm. Η αβεβαιότητα εξαγωγής συντεταγμένων σημείων ενδιαφέροντος κατευθείαν από το τριδιάστατο μοντέλο για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% διαμορφώθηκε στα 2.5 cm κατά X, 4.9 cm κατά Y και 3.3 cm κατά Z.

Λαμβάνοντας υπόψιν την κλίμακα ενός τριδιάστατου τοπογραφικού διαγράμματος, μπορεί να γίνει σκόπευση σημείων στο φωτογραμμετρικό μοντέλο και εξαγωγή των συντεταγμένων τους.

Κρίνεται σκόπιμο όμως, εάν είναι επιθυμητή μεγαλύτερη ακρίβεια οι συντεταγμένες αυτές να διορθώνονται μέσα από περαιτέρω σκόπευση του σημείου στις φωτογραφίες στο λογισμικό επεξεργασίας ή να σκοπεύονται στις φωτογραφίες εξ' αρχής. Στην εφαρμογή αυτής της εργασίας ακολουθώντας την τελευταία προσέγγιση οι ίδιες αβεβαιότητες για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% ήταν 1.3 cm, 1.8 cm και 1.3 cm αντίστοιχα.

Όσον αφορά τη χρησιμότητα μιας τέτοιας εφαρμογής, συγκρίνοντας τους χρόνους εργασιών υπαίθρου και γραφείου γίνεται κατανοητό ότι εξοικονομείται κυρίως χρόνος άλλα και χρήμα για το μηχανικό.

Η παραμονή στο πεδίο για την απόκτηση των πρωτογενών δεδομένων διαρκεί το πολύ μια μέρα ενώ οι εργασίες γραφείου άλλο τόσο. Αντιθέτως για την δημιουργία ενός τριδιάστατου τοπογραφικού διαγράμματος με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους, οι εργασίες υπαίθρου και απόδοσης του σχεδίου μπορεί να κρατήσουν έως και μια βδομάδα.

Παρόλα αυτά μπορεί να λειτουργήσει το ένα συμπληρωματικά στο άλλο. Με το total station ο μηχανικός μπορεί να αποτυπώσει οτιδήποτε βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του οργάνου. Με το drone μπορούν να φωτογραφηθούν όλες οι λεπτομέρειες ενός κτίσματος εκτός όμως από αυτές που κρύβονται πίσω από άλλα φυσικά αντικείμενα όπως δέντρα.

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού, οι λεπτομέρειες οι οποίες δεν μπορούν να αποτυπωθούν επίγεια, μπορούν να συμπληρωθούν από ένα φωτογραμμετρικά κατασκευασμένο τριδιάστατο μοντέλο.

Παράλληλα η φωτογραμμετρική επεξεργασία θα είναι σε θέση να παρέχει και πληροφορίες για τις υφές και τα χρώματα των αντικειμένων όπως επίσης και ένα ψηφιακό μοντέλου εδάφους και ορθοφωτοχάρτη για την περιοχή.

4.2 Προτάσεις

Προτείνεται η ανεξαρτητοποίηση του ενός μοντέλου από το άλλο. Σε επόμενη εφαρμογή, ως φωτοσταθερά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικοί κωδικοποιημένοι στόχοι τοποθετημένοι πάνω στις επιφάνειες των κτιρίων και όχι τοποσταθερά. Οι συντεταγμένες αυτών των στόχων θα

προσδιορίζονται γεωδαιτικά στο τριδιάστατο χώρο και θα μετριοούνται σε δυο θέσεις. Με αυτό το τρόπο και η διαδικασία σκόπευσης τους στο πρόγραμμα θα γίνει πιο γρήγορη αφού εντοπίζονται αυτόματα όπως επίσης και ο μετασχηματισμός και έλεγχος του μοντέλου θα είναι πιο ακριβής.

Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής στον οποίο θα επεξεργαστούν τα δεδομένα θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη υπολογιστική ισχύ ώστε αφενός να είναι σε θέση να επεξεργαστεί όλα τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα και αφετέρου στο στάδιο την ανακατασκευής του μοντέλου να μην υπάρχει περιορισμός πόρων για την δημιουργία των επιφανειών που είναι και το πιο απαιτητικό για κάθε σύστημα στάδιο. Είναι ιδανικό η μνήμη RAM να υπάρχει τουλάχιστον 32 GB διαθέσιμη ώστε να είναι επαρκής για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Επιπλέον μια καλή και ακριβή κάρτα γραφικών είναι αναγκαία σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί ταχύτερη επεξεργασία.

Τέλος, ο έλεγχος να πραγματοποιείται σε θέσεις που είναι εφικτό να προσδιορίσει ο χρήστης στο 3D μοντέλο με μεγάλη ακρίβεια. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται κατά τις εργασίες υπαίθρου να δίνεται μεγάλη προσοχή στο πού σκοπεύεται επίγεια το σημείο ελέγχου και αν είναι δυνατό να εντοπίζονται θέσεις και λεπτομέρειες τέτοιες οι οποίες είναι μικρές και ταυτόχρονα ευδιάκριτες ή ακόμα να χρησιμοποιούνται προσημασμένα σημεία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αγατζά-Μπαλοδήμου Α. Μ., *Θεωρία σφαλμάτων και συνορθώσεις Ι*, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2009.
2. Αδαμόπουλος Ε., *Διερεύνηση πλοήγησης και προγραμματισμού πτήσης με μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
3. Βέργος Κ., *Διερεύνηση και αξιολόγηση μεθοδολογιών συνένωσης νεφών σημείων*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2015, σελ. 30-34.
4. Γεωργόπουλος Α., Δουλάμης Α., *Αυτοματισμοί στην Φωτογραμμετρία*, Διαφάνειες Διαλέξεων, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2016
5. Δρόσος Σ., *Τρισδιάστατη αποτύπωση αντικειμένων με Μη επανδρωμένα Εναέρια Μέσα-UAV*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2015.
6. Ιωαννίδου Σ., *Δημιουργία τριδιάστατου τοπογραφικού με επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους. Εφαρμογή στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό πάρκο Λαυρίου*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2018.
7. Καλημέρης Γ., *Έλεγχος της δυναμικής συμπεριφοράς μόνιμου σταθμού αναφοράς GNSS, Εφαρμογή στον σταθμό 024A του HEPOS στην Εύβοια*, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα 2016, σελ. 143-176.
8. Μελανίτης Ν., *Εφαρμογές τρισδιάστατης ανακατασκευής με γεωμετρία πολλών όψεων*, Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα 2014.
9. Παπαχρήστου Η, *Εκτίμηση τρισδιάστατου σχήματος από κίνηση με χρήση γεωμετρικής άλγεβρας*, Διπλωματική Εργασία, ΗΜΜΥ, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2004.
10. Πατιάς Π., *Εισαγωγή στη φωτογραμμετρία*, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 1991.
11. Barry P., Coakley R., *Accuracy of UAV Photogrammetry compared with Network RTK GPS*, Δημοσίευση, Ιρλανδία 2013.

12. Evans B., *Practical 3D Printers. The Science and Art of 3D Printing*, Apress, New York 2012.
13. Kraus K., *Φωτογραμμετρία*, Γ' Έκδοση, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα 2010.

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

1. <https://el.wikipedia.org/> (last access, 01/2018)
2. <http://www.agisoft.com/> (last access, 01/2018)
3. <https://www.dji.com/> (last access, 01/2018)
4. <http://geoawesomeness.com/> (last access, 02/2018)
5. <http://www.ltp.ntua.gr/home> (last access, 02/2018)
6. <https://dinosaurpalaeo.wordpress.com/2015/10/11/photogrammetry-tutorial-11-how-to-handle-a-project-in-agisoft-photoscan/> (last access, 03/2018)
7. <http://adv-geo-research.blogspot.com/2015/06/photoscan-crash-course-v1-1.html> (last access, 04/2018)
8. <https://www.dxomark.com/Cameras/DJI/Phantom4-Pro---Specifications> (last access, 04/2018)
9. <https://sketchfab.com/> (last access, 05/2018)
10. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/community/posts/205984103-Negative-Altitude-Values> (last access, 05/2018)
11. <https://sites.google.com/a/g.clemson.edu/clemsongeospatial/home/uav-and-lidar-services-from-ccgt/processing-uav-data-with-photoscan> (last access, 05/2018)
12. https://gec.cr.usgs.gov/outgoing/UAS/workshop_data/2017_UAS_Federal_Users_Workshop/Lab%20%20UAS%20MicaSense%20sfm%20Workshop%202017/PhotoScan%20Processing%20Procedures%20MicaSense%20March%202017.pdf (last access, 06/2018)
13. http://www.agisoft.ru/w/index.php?title=PhotoScan/Tips_and_Tricks (last access, 06/2018)
14. <http://www.agisoft.com/forum/> (last access, 06/2018)

15. <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/chapter3> (last access, 06/2018)