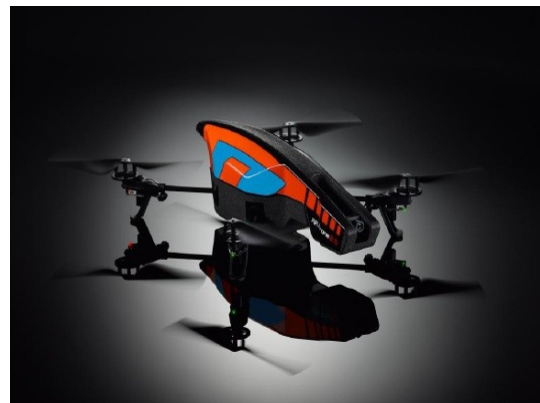




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΜΗ
ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ»*



ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΜΗ
ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

Επιβλέπων: Γεωργόπουλος Ανδρέας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 30 Οκτωβρίου 2014.

Γεωργόπουλος Ανδρέας Ιωαννίδης Χαράλαμπος Καραντζαλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Καθηγητή Ανδρέα Γεωργόπουλο, τόσο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Η βοήθεια που μου παρείχε σε όλα τα επίπεδα είναι ανεκτίμητη και συντέλεσε τα μέγιστα ώστε να ολοκληρωθεί αυτή η εργασία. Τον ευχαριστώ θερμά για όλα.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το πρακτικό τμήμα της εργασίας, μου παραχωρήθηκαν από τον συντονιστή και τους συμμετέχοντες στο Εντατικό Πρόγραμμα (Intensive Programme) ErasmusHERICT (<http://herict.survey.ntua.gr/2013/>), που οργανώθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας στην Ρόδο τον Ιούλιο του 2013.

Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξή της σε όλες μου τις προσπάθειες και τις αποφάσεις.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για τις υπέροχες στιγμές που μοιραστήκαμε, με την ευχή και τη βιγουριά ότι αυτές θα συνεχιστούν και τα επόμενα χρόνια.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης και η συμβολή τους στη Φωτογραμμετρία.

Περιγράφεται μια καινούρια μέθοδος φωτογραμμετρικών εργασιών που έχει βρει μεγάλη διάδοση τα τελευταία χρόνια. Η μέθοδος αυτή ακολουθεί τη φωτογραμμετρική διαδικασία χρησιμοποιώντας ως φορείς λήψης εικόνων μικρές μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες, στις οποίες ενσωματώνονται, συνήθως, απλές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι υπάρχουσες κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων που κυκλοφορούν και η εξέλιξή τους στην πάροδο των χρόνων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και συγκρίνονται όλα τα είδη μη επανδρωμένων πλατφορμών που προσφέρονται για χαρτογράφηση, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα σύγχρονα συστήματα. Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν και επιλέγονται κάποια αντιπροσωπευτικά εμπορικά συστήματα, προκειμένου να διαπιστωθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των κύριων κατηγοριών. Επισημαίνονται επίσης, τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εξετάζεται η χρησιμότητά τους σε διάφορες εφαρμογές και παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέρχονται από τις εργασίες του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας για την υποστήριξη της αρχαιολογικής ανασκαφής στον οικισμό των Βασιλικών στον αρχαιολογικό χώρο της Κυμισάλας στη Ρόδο, για την αξιολόγηση και την σύγκριση των φωτογραμμετρικών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από αυτά. Για την επεξεργασία των εικόνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Photoscan.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, συνοψίζονται όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο.

Abstract

The main purpose of this thesis is to investigate the capabilities of the Unmanned Air Vehicles and their contribution to Photogrammetry.

A new method of photogrammetric measurements, which has been widely spread during the past few years, is described. This method follows the photogrammetric workflow using small UAV systems as image acquisition platforms. On these UAVs, there are usually simple compact digital cameras attached.

The first chapter includes the existent classifications of the UAVs and their development as years passed by.

In the second chapter, all kinds of UAVs available for mapping will be presented and compared and contrasted, while emphasis will be placed on modern autonomous UAVs. The basic characteristics that make them different will be analysed and some typical commercial UAVs will be chosen in order to establish the similarities and differences between the main categories. Their strengths and weaknesses will also be highlighted.

In the third chapter, the practicality of UAVs in several occasions will be examined and indicative case studies will be presented.

The fourth chapter includes the data gathered from the work of the Photogrammetry Lab in support of the archaeological excavation in Vasiliki settlement in the archaeological space of Kymisala in Rhodes. This data will contribute to the evaluation and comparison of the photogrammetric products that can be produced from them. The computer vision programme Photoscan was used for the processing of the images.

The last chapter summarizes the theoretical and practical conclusions that emerged through the investigation of the capabilities of the UAVs.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
1.1 Σκοπός της εργασίας	3
1.2 Τι είναι UAV	3
1.3 Κατηγοριοποίηση	7
1.4 Ιστορική αναδρομή.....	10
1.4.1 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των αερόστατων στη Φωτογραμμετρία	10
1.4.2 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των αετών στη Φωτογραμμετρία	11
1.4.3 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των σύγχρονων ΜΕΕΠ.....	12
2. STATE-OF-THE-ART.....	15
2.1 Μη επανδρωμένες πλατφόρμες για χαρτογράφηση	15
2.2 Αερόστατα.....	16
2.3 Αετοί.....	16
2.4 Σύγχρονες μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες.....	18
2.4.1 ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων.....	20
2.4.2 ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων.....	22
2.4.3 Ομοιότητες και διαφορές των σύγχρονων ΜΕΕΠ.....	24
2.5 Εγγενή Πλεονεκτήματα.....	25
2.5.1 Η ενσωμάτωση συστημάτων GPS/INS ως συγκριτικό πλεονέκτημα	26
2.6 Εγγενή μειονεκτήματα	26
2.6.1 Βασικά μειονεκτήματα που διέπουν όλες τις ΜΕΕΠ	26
2.6.2 Αδυναμίες των τηλεκατευθυνόμενων ΜΕΕΠ	27
2.6.3 Αδυναμίες των αυτόνομων ΜΕΕΠ	27
2.7 Νομοθεσία	28
3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	30
3.1 Χαρτογράφηση μικρών και μεσαίων εκτάσεων	30
3.2 Προστασία πολιτιστικής κληρονομιάς.....	30
3.3 Μεταλλευτική βιομηχανία- Εξορύξεις	31
3.4 Κατασκευές.....	31
3.5 Γεωργία	31
3.6 Γεωεπιστήμες.....	32
3.7 Περισσότερες εφαρμογές και αγορές εργασίας.....	32
3.8 Περιπτώσεις μελέτης.....	32
3.8.1 Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Coran στην Ονδούρα	32

3.8.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την ενσωμάτωση ενός ελαφριού συστήματος LiDAR σε μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα	37
4. ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ UAV	40
4.1 Ροή εργασιών	40
4.2 Προγραμματισμός πτήσης	41
4.2.1 Συστήματα προγραμματισμού πτήσης.....	42
4.2.3 Σύγκριση των λειτουργιών πλοήγησης των ΜΕΕΠ.....	45
4.3 Προεπεξεργασία εικόνων UAV	48
4.4 Φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων από ΜΕΕΠ Πολλαπλών Στροφείων	49
4.4.1 Συλλογή δεδομένων	49
4.4.2 Φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων στο Photoscan	51
4.5 Φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων από ΜΕΕΠ Σταθερών Πτερυγίων	59
4.5.1 Συλλογή δεδομένων	59
4.5.2 Φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων στο Photoscan	61
4.6 Αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων	65
4.6.1 Αξιολόγηση των δεδομένων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε	65
4.6.2 Δυνατότητες επεξεργασίας.....	67
4.6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	67
4.7 Συνδυασμός εικόνων που έχουν συλλεχθεί από ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων και ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων σε ένα ενιαίο έργο	70
4.8 Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από υπέρυθρες εικόνες που έχουν συλλεχθεί από ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων	77
4.8.1 Συλλογή δεδομένων	77
4.8.2 Αποτελέσματα από την φωτογραμμετρική επεξεργασία στο Photoscan	78
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	81
5.1 Συμπεράσματα	81
5.2 Μελλοντικές Προοπτικές	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	86
Παράρτημα Α.....	86
Παράρτημα Β.....	87
Παράρτημα Γ.....	89

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Τα τελευταία χρόνια έχει βρει μεγάλη διάδοση μια καινούρια μέθοδος φωτογραμμετρικών εργασιών. Η μέθοδος αυτή ακολουθεί τη φωτογραμμετρική διαδικασία χρησιμοποιώντας ως φορείς λήψης εικόνων μικρές μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες, στις οποίες ενσωματώνονται, συνήθως, απλές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Οι νέες τάσεις αυτοματοποίησης της φωτογραμμετρικής διαδικασίας συμβάλουν στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας αυτής της μεθόδου. Κέντρισε, επομένως, το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών και επιστημόνων και πραγματοποιήθηκαν αρκετά συνέδρια με θέμα την μέθοδο αυτή από τη Διεθνή Ένωση της Φωτογραμμετρίας και της Τηλεπισκόπησης (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) τη τελευταία δεκαετία.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διεξοδική μελέτη αυτής της μεθόδου τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Το θεωρητικό μέρος ξεκινάει με τον ορισμό, τις υπάρχουσες κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων που κυκλοφορούν και την εξέλιξή τους στην πάροδο των χρόνων. Πρωταρχικό μέλημα αποτελεί η αντιπροσωπευτική παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών τους και του τρόπου λειτουργίας τους. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, επιλέγονται ενδεικτικά κάποια εμπορικά συστήματα από κάθε κατηγορία, ώστε να διευκολυνθεί η σύγκριση και η αξιολόγησή τους. Η ανάλυση της τεχνογνωσίας που χρησιμοποιούν (state-of-the-art), η προβολή των πλεονεκτημάτων τους αλλά και η επισήμανση των αδυναμιών τους συντελούν στη βαθύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων τους και στην αποτελεσματικότερη χρήση τους. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις μελέτης και εφαρμογές.

Σε πρακτικό επίπεδο, κυρίαρχος στόχος είναι η αξιολόγηση των φωτογραμμετρικών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από εικόνες που έχουν παρθεί από μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέρχονται από τις εργασίες του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας για την υποστήριξη της αρχαιολογικής ανασκαφής στον οικισμό των Κυμισσαλέων στη Ρόδο (Acevedo et al. 2013). Χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης των διαδικασιών επεξεργασίας.

1.2 Τι είναι UAV

Unmanned aerial vehicles (UAV), are to be understood as uninhabited and reusable aerial vehicles (Blyenburgh, 1999). Σύμφωνα με τον Blyenburgh, δηλαδή, τα UAV ορίζονται ως μη «κατοικημένα» από τον άνθρωπο και επαναχρησιμοποιήσιμα εναέρια οχήματα.

Τα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης αποτελούνται τα τρία μέρη:

- την πλατφόρμα
- το φορτίο, στην απλούστερη περίπτωση, μια ψηφιακή μηχανή και

- τον επίγειο σταθμό ελέγχου για την καθοδήγηση και την παρακολούθηση της πτήσης από την απογείωση έως την προσγείωση.

Εκτός από την πλατφόρμα λήψης, συνδυάζονται και άλλοι αισθητήρες πλοήγησης όπως συστήματα GNSS, INS, πυξίδες, βαρόμετρα, για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού της πλατφόρμας. Ο τύπος του φορτίου εξαρτάται από την εφαρμογή που πρόκειται να αντιμετωπιστεί. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ψηφιακές μηχανές, πολυφασματικοί και υπερφασματικοί σαρωτές, σαρωτές λέιζερ, SAR κ.ά.

Οι μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες ή αλλιώς ΜΕΕΠ, αποτελούν μια πολύτιμη πηγή δεδομένων σε περιπτώσεις ελέγχου, παρακολούθησης, χαρτογράφησης και τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Οι ΜΕΕΠ και τα μικρά επανδρωμένα αερομεταφερόμενα συστήματα, παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, όπως η χαμηλή ταχύτητα πτήσης, η ευελιξία στις παραμέτρους προγραμματισμού πτήσης, οι σύνθετες άτρακτοι και οι βελτιστοποιημένες αεροδυναμικές πτέρυγες. Η βασική διαφορά μεταξύ των ΜΕΕΠ με τα επανδρωμένα αεροσκάφη είναι ότι στα πρώτα δεν απαιτείται η ύπαρξη πιλότου μέσα στο αεροσκάφος. Το γεγονός αυτό δεν σημαίνει όμως ότι αυτά τα συστήματα πετούν μόνα τους. Τα οχήματα αυτά είναι ελεγχόμενα από μακριά, ημιαυτόνομα, αυτόνομα ή συνδυασμός όλων των παραπάνω. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι βασικότερες διαφορές μεταξύ των ΜΕΕΠ και των επανδρωμένων αεροσκαφών.

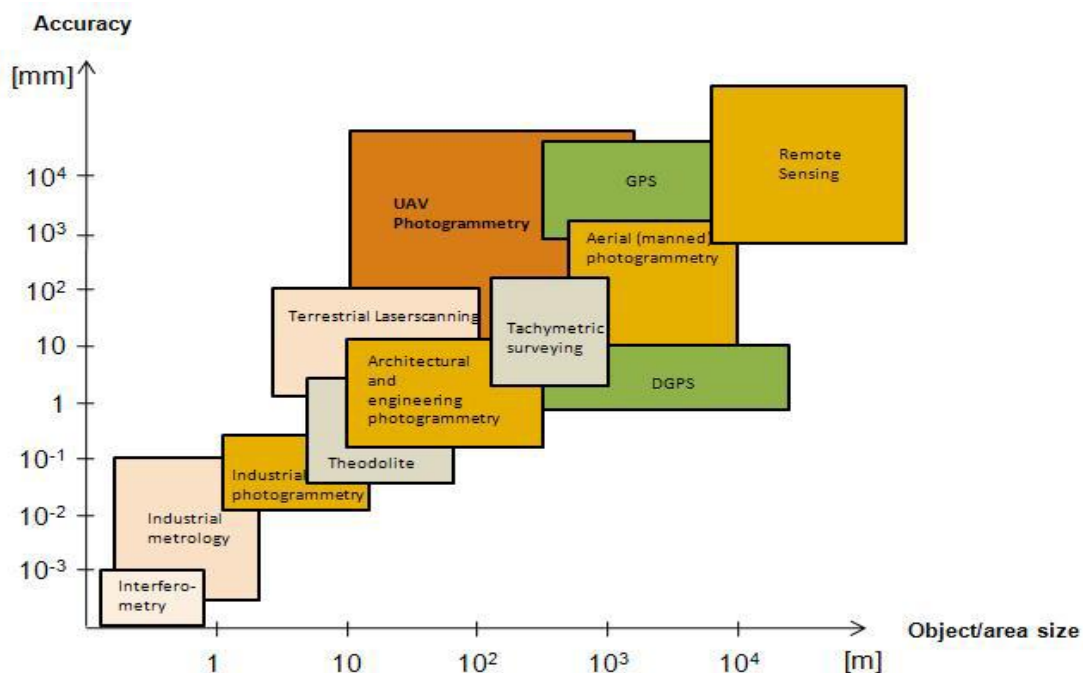
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των αεροφωτογραφίσεων με επανδρωμένα αεροσκάφη και ΜΕΕΠ (Cramer, 2014)

Αεροφωτογραφίσεις με επανδρωμένα αεροσκάφη	Αεροφωτογραφίσεις με μη επανδρωμένα συστήματα
Πολύ καλός προσδιορισμός της τροχιάς της πτήσης	Εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες
Ομαλή τροχιά, σταθερή πλοήγηση	Αστάθεια, μεταβολές στον προσανατολισμό των λήψεων
Τήρηση των επικαλύψεων και των παραμέτρων του προγραμματισμού πτήσης	Εξάρτηση από την λειτουργία πλοήγησης και του προγράμματος προσομοίωσης πτήσης
Χρήση φωτογραφικών μηχανών μεγάλου φορμάτ/ μεγαλύτερη κάλυψη περιοχής ανά εικόνα	Χρήση ερασιτεχνικών μηχανών μικρού φορμάτ/ μικρότερο εύρος κάλυψης
Χρήση μετρητικών μηχανών με σταθερή και γνωστή γεωμετρία	Χρήση μη βαθμονομημένων φωτογραφικών μηχανών
Πετούν σε μεγαλύτερα ύψη πτήσης/ μικρότερες προοπτικές παραμορφώσεις	Μεταβολές στο ύψος πτήσης/ τοπική διαφοροποίηση της κλίμακας

Ο όρος UAV χρησιμοποιείται ευρέως στην Πληροφορική, στην Ρομποτική, στην Τεχνητή Νοημοσύνη αλλά και στην Φωτογραμμετρία και την Τηλεπισκόπηση. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται συνώνυμα όπως, Remotely Piloted Vehicle (RPV),

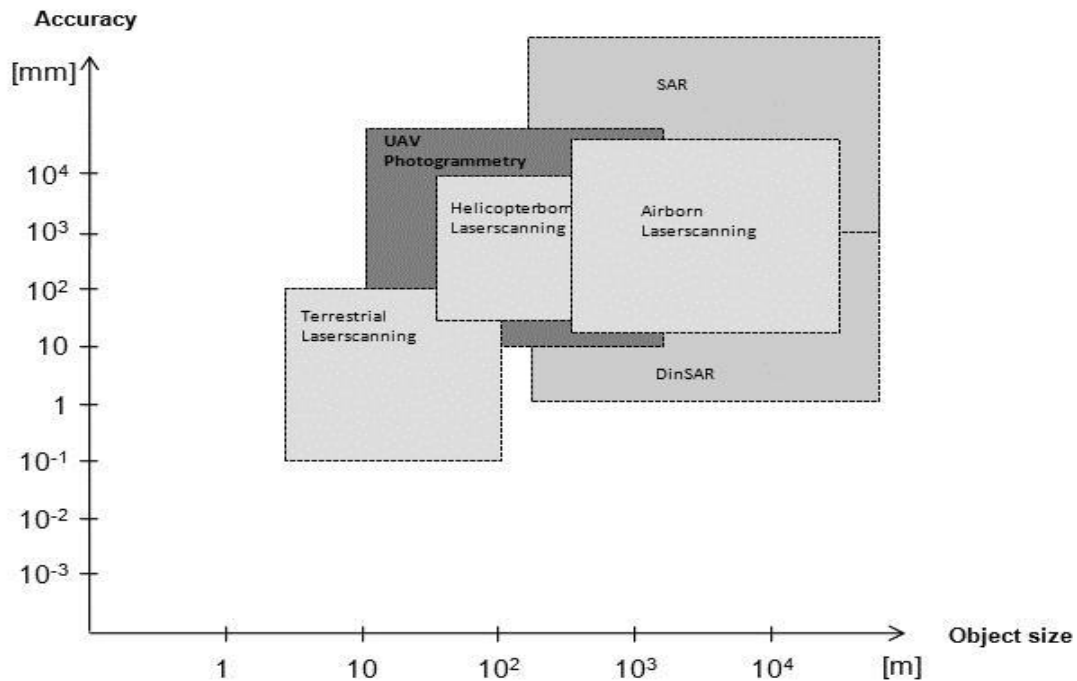
Remotely Operated Aircraft (ROA), Remotely Piloted Aircraft (RPA), Unmanned Vehicle Systems (UVS) κ.ά.

Η πρώτη αναφορά του όρου «UAV Φωτογραμμετρία», έγινε από τον Luhmann, στην προσπάθεια του να γίνει πιο ξεκάθαρη και κατανοητή η κατηγοριοποίηση των φωτογραμμετρικών πλατφορμών και να συνδυάσει όλα τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Παρουσίασε μια γραφική αναπαράσταση όπου ταξινομούνται οι μετρητικές μέθοδοι, με βάση το μέγεθος του προς αποτύπωση αντικειμένου έναντι της απαιτούμενης μετρητικής ακρίβειας (Luhmann, 2006). Στην προσέγγιση αυτή, περιλαμβάνονται σχεδόν όλες οι τεχνικές, αλλά δεν εξετάζεται η συμπεριφορά του κάθε συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες. Ενδεχομένως, λαμβάνοντας υπόψη και το ύψος του προς αποτύπωση αντικειμένου, κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους να μην μπορούν να καλύψουν ολόκληρο το αντικείμενο με την ακρίβεια που τους αποδίδεται.



Εικόνα 1: Η ακρίβεια των μετρητικών μεθόδων σε σχέση με το μέγεθος του αντικειμένου-περιοχής (Luhmann, 2006)

Ο Eisenbeiss, στη διδακτορική του διατριβή, το 2009, χρησιμοποίησε τον όρο «UAV Φωτογραμμετρία» για να περιγράψει ένα νέο φωτογραμμετρικό μετρητικό εργαλείο με πληθώρα εφαρμογών στον τομέα της εγγύς επίγειας, της εναέριας αλλά και της επίγειας φωτογραμμετρίας. Ουσιαστικά η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα, στα οποία τοποθετούνται ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, θερμικά και υπέρυθρα ψηφιακά συστήματα συλλογής δεδομένων, εναέριοι ψηφιακοί σαρωτές (LiDAR), ή συνδυασμός όλων των παραπάνω. Στην Εικόνα 2, συγκρίνεται η «UAV Φωτογραμμετρία» με τις επίγειες και εναέριες μεθόδους σάρωσης με λέιζερ και τις αποτυπώσεις SAR (Synthetic Aperture Radar).



Εικόνα 2: Σύγκριση της ακρίβειας της UAV Φωτογραμμετρίας με τις μεθόδους σάρωσης με λέιζερ και τις αποτυπώσεις SAR (Eisenbeiss, 2009)

Στο Πίνακα 2, περιλαμβάνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της εναέριας, της εγγύς επίγειας και της «UAV Φωτογραμμετρίας».

Πίνακας 2: Βασικά χαρακτηριστικά της εναέριας, της εγγύς επίγειας και της UAV Φωτογραμμετρίας

	Εναέρια Φωτογραμμετρία	Εγγύς επίγεια Φωτογραμμετρία	UAV Φωτογραμμετρία
Συλλογή δεδομένων/ Πτήση	Υποβοηθούμενη/ Χειροκίνητη	Αυτόνομη/ Υποβοηθούμενη/ Χειροκίνητη	Αυτόνομη/ Υποβοηθούμενη/ Χειροκίνητη
Μέγεθος περιοχής	km ²	mm ² -m ²	m ² -km ²
GSD	cm-m	mm-dm	mm-m
Προσανατολισμός λήψης	Κατακόρυφος και πρόσφατα πλάγιος	Κατακόρυφος και πλάγιος	Κατακόρυφος και πλάγιος
Πεδία εφαρμογής	Αποτυπώσεις μεγάλων και πολύ μεγάλων εκτάσεων (χαρτογράφηση, τρισδιάστατη μοντελοποίηση)	Αποτυπώσεις μικρών εκτάσεων και κυρίως αντικειμένων, αρχαιολογικές αποτυπώσεις, τρισδιάστατη μοντελοποίηση	Αποτυπώσεις μικρών και μεσαίων εκτάσεων και αντικειμένων, αρχαιολογικές αποτυπώσεις, τρισδιάστατη μοντελοποίηση, χαρτογράφηση, παρακολούθηση φαινομένων σε πραγματικό-χρόνο

Στην επίγεια φωτογραμμετρία ο προσανατολισμός του άξονα λήψης των εικόνων είναι οριζόντιος, σε αντίθεση με την εγγύς επίγεια και την εναέρια. Επίσης, η απόσταση λήψης των εικόνων στην εγγύς επίγεια φωτογραμμετρία μπορεί να είναι μέχρι 200 μέτρα. Οι βασικές διαφορές της «UAV Φωτογραμμετρίας» με την εναέρια, είναι κυρίως το μικρό εύρος κάλυψης, το ύψος πτήσης, η γεωμετρία του μπλοκ και η αστάθεια αυτών των εναέριων μηχανισμών. Ως εκ τούτου, οι διαφορές αυτές είναι σημαντικές και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αλλά δεν είναι φυσικά ικανές για να συνθέσουν ένα νέο πεδίο Φωτογραμμετρίας.

1.3 Κατηγοριοποίηση

Η κατηγοριοποίηση των μη επανδρωμένων εναέριων πλατφορμών διαφέρει από χώρα σε χώρα και ακόμα δεν έχει προταθεί μια τυποποιημένη κατηγοριοποίηση από την Διεθνή Ένωση Φωτογραμμετρίας και Τηλεπισκόπησης. Στην συνέχεια, περιγράφονται διάφορες κατηγοριοποιήσεις που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές.

Σύμφωνα με την UVS International τα UAV διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- τα τακτικά (tactical) που περιλαμβάνουν τα μικρο (micro), τα μίνι (mini), μικρού και μεσαίου εύρους κάλυψης, μεσαίου εύρους κάλυψης και διάρκειας, χαμηλού υψομέτρου και μεγάλης ανάλυσης, χαμηλού υψομέτρου και μεγάλης διάρκειας και μεσαίου υψομέτρου και μεγάλης διάρκειας συστήματα.
- τα στρατηγικά, που αναφέρονται σε εναέρια συστήματα μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης διάρκειας, στρατοσφαιρικά και εξωστρατοσφαιρικά συστήματα που πετάνε υψηλότερα από 20.000 μέτρα και έχουν διάρκεια 2 έως 4 ημέρες.
- τα ειδικών χρήσεων, όπως είναι τα αυτόνομα μαχητικά οχήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως για στρατιωτικές εφαρμογές.

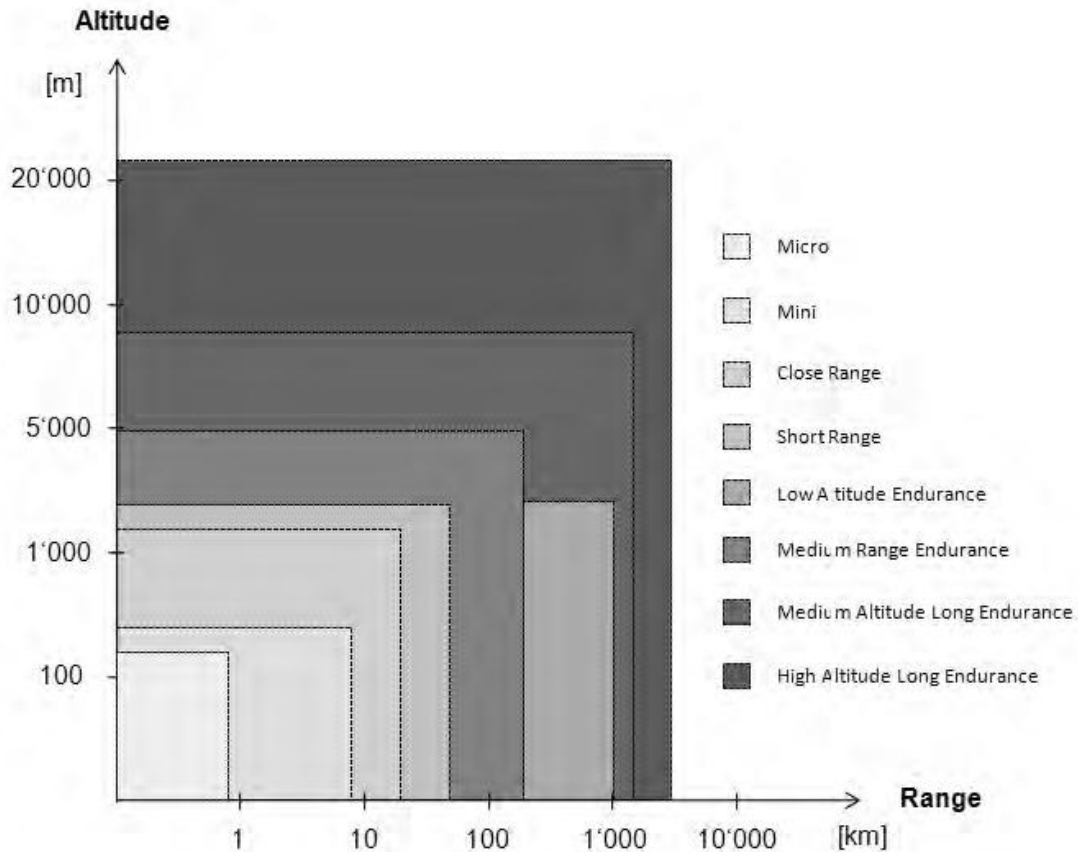
Στη παραπάνω ταξινόμηση οι ΜΕΕΠ διαχωρίστηκαν με βάση το μέγεθος, το βάρος, την διάρκεια, το εύρος κάλυψης και το υψόμετρο πτήσης.

Μια άλλη ταξινόμηση δόθηκε από την CASA (Civil Aviation Safety Authority) το 2001, η οποία επίσης, χωρίζει τα UAV σε τρεις κατηγορίες με βάση το βάρος του φορτίου που μπορούν να μεταφέρουν, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση των UAV από την CASA

Κατηγορία	Κατηγορία I Μικρο (micro) UAV	Κατηγορία II Μικρά UAV	Κατηγορία III Μεγάλα UAV
Προδιαγραφές	Βάρος απογείωσης στα 100g	Βάρος απογείωσης μικρότερο από 150kg	Βάρος απογείωσης μεγαλύτερο από 150kg

Παρόμοια ταξινόμηση με την UVS International, προτείνει και ο Blyenburgh, αφού τις κατηγοριοποιεί με βάση το ύψος πτήσης και το εύρος κάλυψης.



Εικόνα 3: Κατηγοριοποίηση με βάση το υψόμετρο και το εύρος κάλυψης (Blyenburgh, 1999)

Οι μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά των αεροσκαφών, δηλαδή αν είναι ελαφρύτερες ή βαρύτερες από τον αέρα και αν είναι μηχανοκίνητες ή όχι.

Πίνακας 4: Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με το βάρος και την πηγή ενέργειας (Eisenbeiss, 2009)

	Ελαφρύτερα από τον αέρα	Βαρύτερα από τον αέρα		
		Ευκάμπτων πτερυγίων	Σταθερών πτερυγίων	Πολλαπλών στροφείων
Μη μηχανοκίνητα	Balloon	Hang glider	Gliders	Rotor-kite
		Paraglider		
		Kites		
Μηχανοκίνητα	Airship	Paraglider	Propeller	Single rotors
			Jet engines	Coaxial
				Quadrotors
				Multi-rotors

Ο Eisenbeiss πρότεινε μια επιπλέον ταξινόμηση, στην οποία οι ΜΕΕΠ διακρίνονται στις εξής 3 κατηγορίες:

- Ανοιχτού κώδικα και χειροκίνητου ελέγχου (Open-source and Manual controlled UAV/ κατηγορία OM)
- Μίκρο και Μίνι (Micro and Mini UAV/ κατηγορία M) και
- Μεγάλου Φορτίου (Large payload UAV/ κατηγορία L).

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα ανοιχτού κώδικα και μη εμπορικά συστήματα, όπου ο εξοπλισμός δεν κοστίζει περισσότερα από 5.000 ευρώ. Η δεύτερη συγχωνεύει τα μικρο και τα μίνι UAV, όπως ορίστηκαν από τον Blyenburgh σε μια κατηγορία, όπου το φορτίο περιορίζεται στα 5kg. Η τρίτη κατηγορία αναφέρεται στα UAV με δυνατότητα μεταφοράς φορτίου πάνω από 5kg. Ουσιαστικά, η ταξινόμηση έγινε λαμβάνοντας υπόψη την τιμή και το φορτίο μεταφοράς.

Πίνακας 5: Προτεινόμενη κατηγοριοποίηση από τον Eisenbeiss

Κατηγορία	Επεξήγηση	Περιορισμός (τιμή ή φορτίο)
OM	Συστήματα ανοιχτού κώδικα και χειροκίνητου ελέγχου	Χειροκίνητος έλεγχος και κόστος <5.000 Euro για συστήματα ανοιχτού κώδικα
M	Μίκρο και Μίνι (micro και mini) συστήματα	Φορτίο<5kg
L	Συστήματα μεγάλου φορτίου	Φορτίο>5kg

Συνδυάζοντας την παραπάνω κατηγοριοποίηση με επιπλέον παράγοντες διαφοροποίησης, προέκυψε ο Πίνακας 6:

Πίνακας 6: Κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον τρόπο της γεωαναφοράς, την δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και τις απαιτήσεις τις εφαρμογής (Eisenbeiss, 2009)

Αισθητήρες	Γεωαναφορά	Δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (real-time)	Απαιτήσεις εφαρμογής	Κατηγορία UAV
Χωρίς συστήματα GPS/INS	Μεταγενέστερη	0	Χαμηλή ακρίβεια (m)	Ανοιχτού κώδικα και χειροκίνητου ελέγχου
GPS και INS	Μεταγενέστερη/άμεση	+	Μέτρια ακρίβεια (dm-m)	Μίκρο και Μίνι (micro και mini)
DGPS και INS	Μεταγενέστερη/άμεση	++	Υψηλή ακρίβεια (cm)	Μεγάλου Φορτίου

1.4 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες που χρησιμοποιήθηκαν για φωτογραμμετρικούς σκοπούς είναι οι αετοί και τα αερόστατα. Ωστόσο, χάρη στην συνεχή εξέλιξη της τεχνολογίας, κατασκευάστηκαν πιο σύγχρονα και αξιόπιστα συστήματα, τα γνωστά σε όλους, UAV. Στο σημείο αυτό, θα παρουσιαστεί συνοπτικά, η πορεία όλων των ΜΕΕΠ μέσα από την περιγραφή των πιο σημαντικών προσπαθειών που πραγματοποιήθηκαν και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

1.4.1 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των αερόστατων στη Φωτογραμμετρία

Επιγραμματικά οι σημαντικότεροι σταθμοί στην εξέλιξη του αερόστατου είναι:

1855: Ο Andraud ήταν ο πρώτος που διατύπωσε την σκέψη ότι οι φωτογραφίες που λαμβάνονται από αερόστατο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τοπογραφικούς σκοπούς. (Gruber, 1932)

1858: Ο Felix Tournachon (γνωστός και ως Nadar) πραγματοποίησε τις πρώτες εναέριας λήψεις στο Παρίσι με ένα επανδρωμένο αερόστατο (Association of Royal Air Force Photography Officers, 1977).

1860: Οι S.A. King και J.W. Black πραγματοποίησαν την πιο επιτυχημένη λήψη φωτογραφίας με αερόστατο (Georgopoulos, 1981)

1861-1865: Εκτενής χρήση της μεθόδου αυτής για κατασκοπεία κατά τη διάρκεια του Αμερικανικού Εμφυλίου Πολέμου (Association of Royal Air Force Photography Officers, 1977).

1877: Ο W.B.Woodbury χρησιμοποίησε ένα αυτόματο σύστημα για τον έλεγχο της φωτογραφικής μηχανής, που είναι προσδεμένη σε ένα μη επανδρωμένο αερόστατο (Gruber 1932; Thompson 1966a).

1893: Ο C.B Adams δημοσίευσε μια γραφική μέθοδο για τον αεροτριγωνισμό ενός μπλοκ εικόνων που έχει παρθεί από μη επανδρωμένο αερόστατο (Slama, 1980)

1904: Ο S. Finsterwalder εξακρίβωσε τα βασικά βήματα για τη φωτογραμμετρική επεξεργασία ενός μπλοκ εικόνων, για τη συλλογή του οποίου χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα λήψης το αερόστατο. Βασίστηκε στη θεωρία της Προβολικής Γεωμετρίας και την ελαχιστοτετραγωνική μέθοδο συνόρθωσης.

1932-1977: Η χρήση των αερόστατων ατόνησε εξαιτίας της κατασκευής του αεροπλάνου. Όμως, λίγες δεκαετίες αργότερα, αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για τη χρήση τους, κυρίως λόγω της οικονομικής τους αξίας και της εφαρμογής τους σε μικρά έργα. Την περίοδο αυτή, χρησιμοποιήθηκαν σε αρκετές εφαρμογές όπως: η παρακολούθηση υδρογραφικών φαινομένων (Newton, 1964), η μελέτη των επιπτώσεων των πυρηνικών εκρήξεων στην ατμόσφαιρα (AFCRL, 1967), οι γεωργικές και δασικές εφαρμογές (ASP, 1969). Στην πλειοψηφία αυτών των εφαρμογών χρησιμοποιήθηκαν μεγάλα αερόστατα, ικανά να πετάξουν σε μεγάλο

υψόμετρο. Ο Whittlesey ανέφερε τη χρήση ενός αερόστατου (δεμένου με σχοινί) σε αρχαιολογικές αποτυπώσεις (τις οποίες είχε ξεκινήσει από το 1967).

1978: Ο Γεωργόπουλος (Georgopoulos, 1981) χρησιμοποίησε σφαιρικό αερόστατο με μηχανή μεσαίου φορμάτ για να αποτυπώσει τον αρχαιολογικό χώρο του Κεραμεικού στην Αθήνα.

1977-1980: Οι αρχαιολογικές αποτυπώσεις ήταν το μεγαλύτερο κίνητρο για την χρήση του αερόστατου, ως πλατφόρμα αεροφωτογράφισης (Whittlesey, 1977) καθώς και η χρήση μη μετρητικών μηχανών (Chliveros, 1979; Whittlesey, 1977; Μπαντέκας 1980; Robinson, 1980).

1983: Ο Βοζίκης σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Φωτογραμμετρίας της Βιέννης, χρησιμοποίησε αερόστατο, στο οποίο ενσωμάτωσε κάμερα μεσαίου εστιακού επιπέδου. Επιτεύχθηκε υψηλή ακρίβεια για μικρή περιοχή μελέτης (Vozikis, 1983).

1999: Ο Καρράς, χρησιμοποίησε αερόστατο του ΥΠΠΟ με ερασιτεχνική φωτογραφική μηχανή με ευρυγώνιο φακό (και φιλμ 35mm) και τράβηξε 12 φωτογραφίες μιας αρχαιολογικής τοποθεσίας στην Αθήνα με έντονες μεταβολές στο ανάγλυφό της. Με την επεξεργασία των δεδομένων αυτών, παρήχθησαν ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας και ορθοφωτογραφία, με ακρίβεια εκατοστού (Καρράς, 1999).

2009: Οι Gomez-Lahoz Gonzalez Aguilera χρησιμοποίησαν μη επανδρωμένο αερόστατο για την ανακατασκευή δύο αρχαιολογικών οικισμών στην Ισπανία. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια ήταν 0,03μέτρα και η υψομετρική 0,05μέτρα.

1.4.2 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των αετών στη Φωτογραμμετρία

Οι σημαντικότεροι σταθμοί στην εξέλιξη του αετού είναι:

1883: Ο E.D. Archibald ήταν ο πρώτος που πήρε φωτογραφίες χρησιμοποιώντας αετό, στην προσπάθεια του να μετρήσει την ταχύτητα του άνεμου.

1888: Ο Arthur Batut ανέπτυξε την τεχνική αυτή, χρησιμοποιώντας μια ελαφριά φωτογραφική μηχανή και έναν αετό σε σχήμα ρόμβου.



Εικόνα 4: Η φωτογραφία που τράβηξε ο Arthur Batut στην περιοχή Labruguiere

1904: Ο Scheimpflug εξέτασε πρώτος την συνεισφορά αυτής της μεθόδου στις τοπογραφικές αποτυπώσεις.

Την περίοδο που ακολούθησε, οι αετοί είχαν την ίδια μοίρα με τα αερόστατα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

1978: Ο Γεωργόπουλος (Georgopoulos, 1981), χρησιμοποίησε αετό σχήματος δέλτα με μηχανή μικρού φορμάτ, για να αποτυπώσει ένα αρχαιολογικό χώρο στην Αγγλία. Ασχολήθηκε κυρίως, με την αξιολόγηση των συστημάτων αυτών ως πλατφόρμες λήψης φωτογραφιών.

1971-1980: Ο R.C. Anderson χρησιμοποίησε έναν αετό με αρκετή επιτυχία κατά τη διάρκεια ανασκαφών στην Κύπρο. Στη συνέχεια, κατασκεύασε ένα πιο εξελιγμένο σύστημα, το οποίο χρησιμοποίησε σε αρχαιολογικές αποτυπώσεις στη Συρία και είχε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα (Anderson, 1980).

2002: Ο Aber παρουσίασε ένα σύστημα αετού, το οποίο μπορούσε να πετάξει στα 50 έως 150 μέτρα από το έδαφος και ήταν ανθεκτικός σε ταχύτητες ανέμου 7 έως 11m/s. Επίσης, μπορούσε να ενσωματώσει εύκολα διάφορα είδη φωτογραφικών μηχανών και εφαρμόστηκε αποτελεσματικά σε διάφορες εφαρμογές (Aber,2002).

1.4.3 Διαχρονική εξέλιξη της χρήσης των σύγχρονων ΜΕΕΠ

Οι σημαντικότεροι σταθμοί στην εξέλιξη των σύγχρονων μη επανδρωμένων εναέριων πλατφόρμων είναι:

1979: Οι Przybilla και Wester-Ebbinghaus υπήρξαν από τους πρώτους που πειραματίστηκαν με ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων και διαπίστωσαν ότι τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά λόγω της κακής ποιότητας των εικόνων, που οφειλόταν στην ταχύτητα του αεροπλάνου και την δόνηση της μηχανής (Przybilla και Wester-Ebbinghaus, 1979). Η ΜΕΕΠ είχε κατασκευαστεί από την εταιρεία Hegi, ήταν ελεγχόμενη από απόσταση, με ύψος πτήσης 150 μέτρα, ταχύτητα 11m/s και μέγιστο φορτίο 3kg.



Εικόνα 5: ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων από την εταιρεία Hegi (Przybilla και Wester-Ebbinghaus, 1979)

1980: Ο Wester-Ebbinghaus πρωτοπόρησε χρησιμοποιώντας ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων για φωτογραμμετρικούς σκοπούς. Το σύστημα αυτό ήταν πρότυπο ελικόπτερο, με δυνατότητα ύψους πτήσης από 10 έως 100 μέτρα. Το μέγιστο φορτίο της ήταν 3 κιλά και μπορούσε να ενσωματώσει κάμερα μεσαίου εστιακού επιπέδου. Για την διενέργεια της πτήσης της συγκεκριμένης ΜΕΕΠ απαιτούνταν και πιλότος και πλοηγός. Η σημαντικότερη καινοτομία, ωστόσο, ήταν η επιτυχημένη μείωση της έντασης των δονήσεων με τη χρήση τοιχωμάτων πολυστυρενίου (Wester-Ebbinghaus, 1980).



Εικόνα 6: ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων (Wester-Ebbinghaus, 1980).

1998-2000: Ο Τοκμακίδης πρότεινε τη χρήση ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων για την ανακατασκευή του θόλου των Δελφών. Το σύστημα αυτό παρουσίαζε ομοιότητες με αυτό που χρησιμοποίησε ο Wester-Ebbinghaus, αναφορικά με την απαραίτητη παρουσία πιλότου και πλοηγού. Το φορτίο αυξήθηκε στα 5 κιλά και το μέγιστο ύψος πτήσης στα 500 μέτρα. Διέθετε επίσης ειδικές αναρτήσεις για τον περιορισμό των δονήσεων και έναν μηχανισμό για την περιστροφή της κάμερας έως 90 βαθμούς (καθιστώντας δυνατή τη φωτογράφιση των προσόψεων κτιρίων). Τέλος, το οπτικό σήμα μεταδιδόταν μέσω ενός πομπού σε μια φορητή οθόνη στο έδαφος (Τοκμακίδης 1998 και Θεοδωρίδου, 2000).

2002-2004: Οι Τοκμακίδης και Σκαρλάτος χρησιμοποίησαν το ίδιο σύστημα για την χαρτογράφηση μιας αρχαιολογικής ανασκαφής. Από τις εικόνες που πάρθηκαν σε κλίμακα 1:400, δημιουργήθηκε μια ορθοφωτογραφία της περιοχής (Σκαρλάτος 2004 και Τοκμακίδης και Σκαρλάτος 2002).

2000: Ο Zichinsky χρησιμοποίησε ένα πρότυπο ελικόπτερο, για την συλλογή εικόνων με στόχο τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου ενός ιστορικού μύλου. Για την αποτύπωση του συνδυάστηκαν επίγειες και εναέριες εικόνες. Η ψηφιακή

μηχανή που ενσωματώθηκε στη MEEP ήταν ερασιτεχνική με μικρό εστιακό επίπεδο (Zichinsky, 2000).

2002: Το RMAX της Yamaha χρησιμοποιήθηκε για φωτογραμμετρική διερεύνηση σε πεδία ελέγχου στη Σουηδία, με στόχο την ανάλυση της ακρίβειας συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού (GPS) και των αδρανειακών συστημάτων αναφοράς (INS), που ενσωματώνονται στις MEEP (Eisenbeiss, 2003).

2003: Στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon, το πεδίο της Ρομποτικής, ασχολήθηκε με την ενσωμάτωση συστημάτων LiDAR στις MEEP. Τα αποτελέσματα έδειξαν την δυναμική τους στην λεπτομερή χωρική πληροφορία που περιέχουν τα τρισδιάστατα νέφη σημείων.

2004-2008: Την περίοδο αυτή ο Evaraerts ανέλυσε όλα τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για φωτογραμμετρικούς σκοπούς (Evaerts, 2008).

2008: Ο Eisenbeiss αξιολόγησε την χρήση των MEEP σε διαφορετικά είδη εφαρμογών: στη γεωργία ακριβείας και γεωλογία, στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση ενός μεσαιωνικού κάστρου και στην παραγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, συνδυάζοντας δεδομένα από δύο διαφορετικές MEEP πολλαπλών στροφείων (Eisenbeiss, 2009).

2011-2013: Στα συνέδρια που πραγματοποιήθηκαν στη Ελβετία (Ζυρίχη) και στη Γερμανία (Ρόστοκ), παρουσιάστηκαν τα εξής ζητήματα (είναι διαθέσιμα στις ιστοσελίδες <http://www.uav-g.org> και <http://www.isprs.org>):

- Εφαρμογές των UAV στη χαρτογράφηση, στις γεωεπιστήμες, στη μετεωρολογία, στις περιβαλλοντικές επιστήμες και στην πολιτιστική κληρονομιά
- Η δυνατότητα παρακολούθησης των UAV σε πραγματικό χρόνο
- Η ενσωμάτωση συστημάτων LiDAR και πολυφασματικών αισθητήρων
- Η δυνατότητα άμεσης γεωαναφοράς των εικόνων
- Η δυνατότητα αποφυγής εμποδίων
- Ζητήματα καθοδήγησης, πλοήγησης και έλεγχου των UAV

2014: Έγινε αναφορά στη χρησιμότητα των συστημάτων αυτών, στο Πανελλήνιο Συνέδριο Τοπογράφων Μηχανικών στη Θεσσαλονίκη.

2. STATE-OF-THE-ART

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και συγκρίνονται όλα τα είδη μη επανδρωμένων πλατφορμών που προσφέρονται για χαρτογράφηση, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα σύγχρονα συστήματα. Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν και επιλέγονται κάποια αντιπροσωπευτικά εμπορικά συστήματα, ώστε να διαπιστωθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των κύριων κατηγοριών. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε δύο συστήματα προγραμματισμού πτήσης, τα οποία αποτελούν σημαντική καινοτομία των σύγχρονων συστημάτων έναντι των προγενέστερων. Τέλος, μέσω της ανάλυσης των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, επιτυγχάνεται η βαθύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων τους και η αποτελεσματικότερη χρήση τους.

2.1 Μη επανδρωμένες πλατφόρμες για χαρτογράφηση

Οι μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες που ενδείκνυνται για χαρτογράφηση είναι οι αετοί, τα μπαλόνια, τα αερόστατα, τα ελικόπτερα, τα paraglider, οι πλατφόρμες σταθερών πτερυγών (αεροπλάνα) και οι πλατφόρμες πολλαπλών στροφείων (πολλαπλοί έλικες).

Στο πίνακα που ακολουθεί γίνεται αξιολόγηση των διαφόρων ειδών των ΜΕΕΠ αναφορικά με το κόστος αγοράς και το κόστος συντήρησης, την απαιτούμενη εμπειρία, τον χρόνο πτήσης, την εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες, την ταχύτητα πτήσης και την ακρίβεια συλλογής. Η κλίμακα σύγκρισης κυμαίνεται από το 0 έως το 3, με το 3 να είναι η πιο ευνοϊκή τιμή.

Πίνακας 7: Συγκριτική αξιολόγηση των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης (Σκαρλάτος, 2012)

	Cost	Maintenance & running costs	Deployment time	Experience needed	Time of flight	Weather dependency	Acquisition speed	Acquisition accuracy
Kite	3	3	1	1	2	1	2	0
Balloon	2	2	1	3	3	0	0	2
Airships	1	2	1	3	3	1	0	2
RC single and multicopter	1-0	2-0	3	0	0	2	1-2	3
RC plane	1-0	2-1	2-3	0	1-2	1	3	3
UAV multi copter	1-0	2-0	3	2	0	2	1-2	3
UAV fixed wing	0	2-1	1-3	2	1-2	1	3	3

2.2 Αερόστατα

Τα αερόστατα αποτέλεσαν τα πρώτα συστήματα πλοήγησης πριν την εφεύρεση του αεροπλάνου στις αρχές του 20ου αιώνα. Η χρησιμότητά τους στην εναέρια φωτογραφία παραμένει διαχρονική.

Τα αερόστατα αποτελούνται από ένα περίβλημα, φτιαγμένο συνήθως από ελαφρύ υλικό (ελαστικό ύφασμα ή νάιλον), το οποίο γεμίζεται με αέριο, ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, για να καθίσταται δυνατή η ανύψωσή του. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως για αυτό τον σκοπό είναι το υδρογόνο, το ήλιο και ο θερμός αέρας.

Τα πρώτο αερόστατο που ανυψώθηκε περιείχε θερμό αέρα (Montgolfiere brothers, 1783). Αυτού του είδους τα αερόστατα είναι μεγάλα και ακριβά και για την πλοήγησή τους είναι προτιμότερη η επάνδρωσή τους. Επίσης, για την ασφαλέστερη διαχείρισή τους απαιτούνται συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, όπως χαμηλή ταχύτητα του ανέμου και η σταθερή στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας.

Το ήλιο είναι ακριβότερο συγκριτικά με το υδρογόνο αλλά λιγότερο επικίνδυνο αφού δεν είναι εύφλεκτο. Όμως, το υδρογόνο παρέχει έως και 10% μεγαλύτερη δύναμη ανύψωσης και ως εκ τούτου προτιμάται ευρέως (Brown and Newton, 1962).

Τα αερόστατα διαφέρουν σε σχήμα, μέγεθος και είδος. Όσον αφορά στο σχήμα, συνήθως το εξωτερικό περίβλημα είναι σφαιρικό ή με επίμηκες ελλειψοειδές σχήμα, για λόγους αεροδυναμικής. Τα σφαιρικά αερόστατα είναι μικρά σε μέγεθος και κυμαίνονται από 2 έως 60 κυβικά μέτρα. Είναι φθηνότερα, έχουν μικρότερη διάρκεια, αντέχουν μικρότερο φορτίο και είναι πιο ευάλωτα στον άνεμο. Αντίθετα, τα αερόστατα σε επίμηκες σχήμα είναι πιο σταθερά και ανθεκτικά σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος και ακριβότερα σε σχέση με τα άλλα (Georgopoulos, 1981).

Ανακεφαλαιώνοντας, η χρήση των αερόστατων, ως πλατφόρμα αεροφωτογράφισης, είναι λειτουργική, ικανοποιητικά αξιόπιστη, ασφαλής και κυρίως οικονομική, ειδικά σε περιπτώσεις μικρών έργων όπου απαιτείται απόδοση μεγάλης κλίμακας (Georgopoulos, 1981).

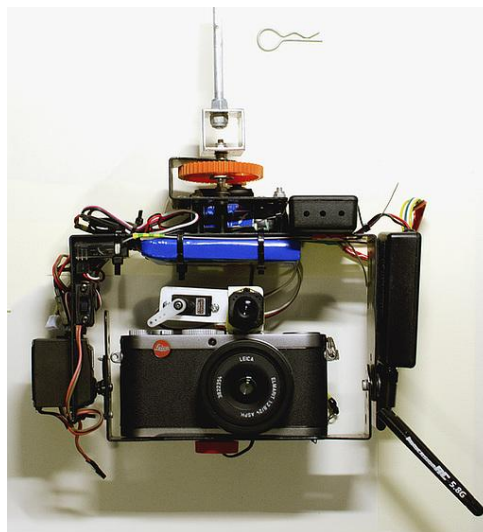
2.3 Αετοί

Με τον όρο «Kite Aerial Photography (KAP)» περιγράφεται η μέθοδος συλλογής ψηφιακών εικόνων χρησιμοποιώντας ως πλατφόρμα λήψης έναν αετό. Ο αετός είναι μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα με το χαμηλότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Ο εξοπλισμός που απαιτείται περιλαμβάνει 3 συστατικά: μια φωτογραφική μηχανή, τα μέσα για τον έλεγχο της και ένα χαρταετό.



Εικόνα 7: Παράδειγμα εξοπλισμού για την εφαρμογή της ΚΑΡ
(<http://www.bill-blake.co.uk>)

Η εξέλιξη των ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών συνιστούν ένα μεγάλο πλεονέκτημα για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, αφού διαθέτουν κάρτες μνήμης μεγάλης χωρητικότητας και είναι δυνατή η λήψη εικόνων. Αντίθετα, στις αναλογικές φωτογραφικές μηχανές, ο αριθμός των λήψεων είναι περιορισμένος, με αποτέλεσμα το κόστος να είναι υψηλό, αφού μέρος του υλικού να είναι πιθανόν άχρηστο. Ανάλογα με τον αετό που θα χρησιμοποιηθεί, διαφοροποιείται και το βάρος που μπορεί να ανυψωθεί. Είναι προτιμότερη, επομένως, η χρήση ερασιτεχνικών μηχανών, αφού μπορούν να ενσωματωθούν στους περισσότερους τύπους αετών και είναι ευκολότερα διαχειρίσιμες σε ασθενείς ανέμους.



Εικόνα 8: Σύστημα έλεγχου της φωτογραφικής μηχανής με δυνατότητα αναμετάδοσης εικόνας
(<http://www.bill-blake.co.uk>)

Υπάρχουν δύο πιθανά σενάρια για τον έλεγχο της φωτογραφικής μηχανής. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει τη ρύθμιση της φωτογραφικής μηχανής με τέτοιο τρόπο, ώστε η λήψη των φωτογραφιών να γίνεται αυτόματα ανά καθορισμένο χρονικό διάστημα. Ο δεύτερος τρόπος είναι ο έλεγχος της φωτογραφικής μηχανής με τηλεχειριστήριο, έχοντας παράλληλα την αναμετάδοση της εικόνας σε βίντεο.

Οι αετοί διαφέρουν σε σχήμα και σε μέγεθος. Οι βασικές προϋποθέσεις για τη χρήση τους σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές είναι το μέγεθος και η σταθερότητά τους. Η πλειονότητα των χαρταετών έχει αρκετά μικρό εύρος ανέμων στο οποίο μπορούν να είναι σταθεροί. Η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, επηρεάζει την αντοχή στον άνεμο καθώς και το μέγιστο δυνατό φορτίο. Επίσης, το σχήμα του πρέπει να είναι αυστηρά συμμετρικό. Ενδεικτικά, ένας αετός είναι κατάλληλος αν είναι σταθερός σε ένα ευρύ φάσμα ανέμων και μπορεί να ανυψώσει επιτυχώς φορτίο 1kg σε ταχύτητα ανέμου 5 Bft.

Για τη διεξαγωγή της μεθόδου αυτής απαιτείται χειριστής με εμπειρία στις πτήσεις με αετό και εξειδικευμένες γνώσεις στη φωτογραφία. Ένα πρόσθετο μειονέκτημα, αποτελεί η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και η έλλειψη ακρίβειας στη συλλογή εικόνων.

Συνοψίζοντας, οι αετοί είναι φτηνοί και εύκολα διαθέσιμοι μηχανισμοί. Ορισμένοι από αυτούς είναι αρκετά σταθεροί. Μπορεί να μην είναι τόσο αξιόπιστοι όσο είναι τα αερόστατα, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάτω από καιρικές συνθήκες στις οποίες τα αερόστατα είναι σχεδόν άχρηστα (Georgopoulos, 1981).

2.4 Σύγχρονες μη επανδρωμένες εναέριας πλατφόρμες

Οι σύγχρονες ΜΕΕΠ ξεχωρίζουν από τις προγενέστερες χάρη στην αναβάθμισή τους σε μερικώς υποβοηθούμενες ή πλήρως αυτόνομες. Αυτό επιτεύχθηκε με την ενσωμάτωση σε αυτές συστημάτων GPS και IMU καθώς και την εγκατάσταση προγραμμάτων αυτόματου πιλότου. Η έννοια της μερικής υποβοήθησης των ΜΕΕΠ συνίσταται στην παρουσία ενός χειριστή που οι λειτουργίες ελέγχου που χρησιμοποιεί είναι μπροστά-πίσω, αριστερά-δεξιά, πάνω-κάτω, οι οποίες με την βοήθεια του αυτόματου πιλότου μετατρέπονται σε αντίστοιχες μηχανικές εντολές. Στα πλήρως αυτόνομα συστήματα ο χειρισμός γίνεται ακόμα ευκολότερος, αφού ο χρήστης της ΜΕΕΠ καθορίζει την τροχιά της πτήσης στην οθόνη ενός υπολογιστή με την βοήθεια σημείων. Με αυτό τον τρόπο η ΜΕΕΠ απογειώνεται και ακολουθεί την προκαθορισμένη πορεία, γίνεται η λήψη των εικόνων σύμφωνα με τον προγραμματισμό της πτήσης και τέλος προσγειώνεται αυτόνομα. Ως εκ τούτου, οι εικόνες που λαμβάνονται είναι αρκετά καλής ποιότητας και προσφέρονται για περαιτέρω επεξεργασία με την βοήθεια ψηφιακών φωτογραμμετρικών σταθμών αλλά και αυτοματοποιημένων προγραμμάτων. Συνεκτιμώντας όλα τα παραπάνω, οι σύγχρονες ΜΕΕΠ είναι ιδανικές για φωτογραμμετρική χρήση.

Λόγω της συνεχούς εξέλιξης της τεχνολογίας, οι προδιαγραφές κάθε συστήματος διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή, τον προμηθευτή και τον πωλητή. Οι

ΜΕΕΠ μπορούν να αξιολογηθούν και να συγκριθούν με βάση ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους. Τα βασικότερα είναι:

- ο τύπος της πλατφόρμας
- οι διαστάσεις της πλατφόρμας
- η αντοχή στις συνθήκες περιβάλλοντος
- οι αισθητήρες πλοήγησης
- οι συσκευές εικόνας ή σάρωσης που μπορούν να τοποθετηθούν
- ο τρόπος απογείωσης και προσγείωσης
- ο τρόπος πλοήγησης
- το ενσωματωμένο λογισμικό (εάν υπάρχει)
- οι μηχανισμοί ασφαλείας
- ο επίγειος σταθμός βάσης

Η πλατφόρμα διαφοροποιείται με βάση τον τύπο της, το μέγιστο φορτίο που μπορεί να μεταφέρει, το μέγιστο χρόνο διαμονής στον αέρα, τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει, το μέγιστο ύψος πτήσης της και τον τύπο προώθησης που χρησιμοποιεί.

Οι διαστάσεις της αφορούν κυρίως το άνοιγμα των φτερών, το συνολικό της βάρος, το βάρος τη μπαταρίας και τον αριθμό των στροφείων της.

Η αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες σχετίζεται με την ελάχιστη και την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας, την μέγιστη ταχύτητα ανέμου καθώς και την μέγιστη υγρασία.

Οι αισθητήρες πλοήγησης αποτελούνται από συστήματα GNSS, IMU, βαρόμετρο και πυξίδα.

Οι συσκευές εικόνας και σάρωσης που μπορούν να τοποθετηθούν είναι συνήθως απλές ψηφιακές μηχανές, αλλά και επιπρόσθετοι αισθητήρες όπως κάμερες εγγύς υπέρυθρου φάσματος και συσκευές LiDAR. Σημαντική είναι και η δυνατότητα αλλαγής των δεκτών αυτών και η δυνατότητα πλάγιων λήψεων.

Όσον αφορά την απογείωση και την προσγείωση των συστημάτων αυτών οι βασικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι ο χώρος που απαιτείται, ο τρόπος απογείωσης, η δυνατότητα αυτόματης προσγείωσης και ο προγραμματισμός της πτήσης.

Η πλοήγηση των ΜΕΕΠ εξαρτάται από τον ελάχιστο αριθμό πληρώματος στο πεδίο, τις πιλοτικές ικανότητες και τον χρόνο εκπαίδευσης που απαιτούνται.

Πολλές ΜΕΕΠ διαθέτουν ενσωματωμένο λογισμικό για διαδικασίες όπως ο φωτοτριγωνισμός με την μέθοδο της δέσμης, η αυτοβαθμονόμηση, ο προγραμματισμός πτήσης, η εξαγωγή και η επεξεργασία νέφους σημείων.

Από άποψη ασφαλείας, ορισμένες διαθέτουν προπέλες προφύλαξης, συστήματα αποφυγής εμποδίων και αυτόνομη προσγείωση ασφαλείας.

Ο επίγειος σταθμός βάσης μπορεί να περιλαμβάνει Η/Υ και δυνατότητα μεταφόρτωσης εικόνων και βίντεο σε πραγματικό χρόνο.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ΜΕΕΠ μπορούν να ταξινομηθούν με αρκετούς τρόπους. Ο πιο βασικός όμως παράγοντας διαφοροποίησης των σύγχρονων ΜΕΕΠ είναι ο τύπος της πλατφόρμας. Ο τύπος της πλατφόρμας διακρίνεται σε σταθερών πτερυγίων και σε πολλαπλών στροφείων. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική αφού καθορίζει το φάσμα κάλυψης, το ύψος πτήσης, την ταχύτητα και την αντοχή. Κατά γενική ομολογία, οι ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων προτιμώνται για μεγάλες χαρτογραφήσεις και μεγαλύτερη διάρκεια πτήσεων, ενώ οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων ενδείκνυνται για αποτυπώσεις μεγαλύτερης κλίμακας και χαμηλότερα ύψη πτήσης.

2.4.1 ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων

Οι ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων διακρίνονται από μεγαλύτερη αυτονομία αφού έχουν την δυνατότητα ακόμα και πλήρους πτήσης χωρίς χειριστή. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες ΜΕΕΠ είναι ότι μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις, αφού έχουν την δυνατότητα για μεγαλύτερο ύψος πτήσης και μεγαλύτερη ταχύτητα.

Απαιτείται, ωστόσο, αρκετός χώρος για την απογείωσή και την προσγείωσή τους, αφού η απογείωσή τους πραγματοποιείται είτε με καταπέλτη είτε εκτοξευοντάς τις με το χέρι. Για την προσγείωση μερικών από αυτών χρησιμοποιείται αλεξίπτωτο.



Εικόνα 9: Παραδείγματα του τρόπου απογείωσης των ΜΕΕΠ

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τέσσερα ενδεικτικά εμπορικά συστήματα αυτής της κατηγορίας: το Sirius Pro της MAVinci GmbH, το eBee της senseFly, το Trimble UX5 της Trimble και το EasyMap UAV της Fotomapy Ltd.



Εικόνα 10: Εμπορικά συστήματα ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων
<http://www.geo-matching.com>

Ο Πίνακας 8 περιλαμβάνει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών.

Πίνακας 8: Βασικά χαρακτηριστικά ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων

Χαρακτηριστικό	SIRIUS PRO	eBee	Trimble UX5	EasyMap UAV
Βάρος (σε kg)	2050	0.405	2.5	1.4
Προώθηση	Ηλεκτρική	Πολυμερής μπαταρία λιθίου	Ηλεκτρική προπέλα ώθησης	Ηλεκτρική
Αριθμός στροφείων		1	1	1
Μέγιστο φορτίο (σε kg)	1.1	0.15	0.5	0.35
Ύψος πτήσης (σε m)	1800	1000	750	1000
Ταχύτητα ανέμου (σε m/s)	18	12	18	15
Μέγιστη παραμονή στον αέρα (σε min)	50	45	50	45
Πλάγιες λήψεις	OXI	OXI	OXI	OXI
Απαιτούμενος χώρος για απογείωση και προσγείωση	100	25	20	25

(σε m)				
Τρόπος απογείωσης	Εκτόξευση με το χέρι	Εκτόξευση με το χέρι	Εκτόξευση με καταπέλτη	Εκτόξευση με το χέρι

Όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη είναι η πλατφόρμα τόσο μεγαλύτερο είναι και το φορτίο που μπορεί να μεταφέρει, ενώ αυξάνεται κατά πολύ και ο χώρος που απαιτείται για την απογείωσή της. Όλα τα συστήματα αυτής της κατηγορίας, δεν έχουν την δυνατότητα πλάγιων λήψεων, αναπτύσσουν περίπου τις ίδιες ταχύτητες και η μέγιστη παραμονή στον αέρα φτάνει τα 50 λεπτά.

2.4.2 ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων

Οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων χρησιμοποιούνται ευρέως για αποτυπώσεις με μικρό φάσμα κάλυψης επειδή πετούν σε χαμηλότερα ύψη πτήσης. Παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα στον άνεμο και ως εκ τούτου, οι εικόνες που λαμβάνονται προσφέρονται για φωτογραμμετρική αξιοποίηση.

Στη συνέχεια, θα εξεταστούν ξεχωριστά οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων ανάλογα με το μέγεθος και το φορτίο που μπορούν να μεταφέρουν. Οι βασικές κατηγορίες που καθορίστηκαν από τον Eisenbeiss είναι η M-CLASS και η L-CLASS.

Αντιπροσωπευτικά εμπορικά συστήματα της κατηγορίας M-CLASS είναι τα εξής: το Aibot X6 της Aibotix GmbH, το Asc Tec Falcon 8 της Ascending Technologies, το md4-200 της Microdrones και το AR-180 της AirRobot. Στην Εικόνα 11 περιλαμβάνονται και τα τέσσερα αυτά συστήματα.



Εικόνα 11: Εμπορικά συστήματα ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων
(<http://www.geo-matching.com>)

Στον Πίνακα 9 γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση σε βασικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 9: Βασικά χαρακτηριστικά ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων

Χαρακτηριστικό	Aibot X6	Asc Tec Falcon 8	md4-200	AR180
Βάρος (σε kg)	2.5	0.98	0.800	2.5
Προώθηση	Ηλεκτρική	Ηλεκτρική	Ηλεκτρική	Ηλεκτρική
Αριθμός στροφείων	6	8	4	4
Μέγιστο φορτίο (σε kg)	2.5	0.75	0.200	1.5
Ύψος πτήσης (σε m)	2000	1000	1000	
Ταχύτητα ανέμου (σε m/s)	12	15		10
Μέγιστη παραμονή στον αέρα (σε min)	30	22	30	35
Πλάγιες λήψεις	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Απαιτούμενος χώρος για απογείωση (σε m)	2	4	1	5
Τρόπος απογείωσης	VTOL	VTOL	VTOL	VTOL

Η βασική ιδιαιτερότητα των συστημάτων αυτής της κατηγορίας είναι ο τρόπος απογείωσης. Ο απαιτούμενος χώρος για απογείωση είναι μικρός και φτάνει έως τα 5 μέτρα.

Στην κατηγορία L-CLASS, θα εξεταστούν οι εξής πλατφόρμες: το Scout B1-100 της Aeroscout και το Geocopter GC 201 της Geocopter.

Scout B1-100 UAV



Geocopter GC-201



Εικόνα 12: Συστήματα της κατηγορίας L-Class

Οι πλατφόρμες αυτές χαρακτηρίζονται κυρίως από την δυνατότητά τους να μεταφέρουν μεγαλύτερο φορτίο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ως εκ τούτου, μπορούν να μεταφέρουν και περισσότερα καύσιμα, άρα και να επιμηκύνουν την διάρκεια της πτήσης τους έως και 240 λεπτά. Επιπρόσθετα, είναι δυνατός ο συνδυασμός παραπάνω του ενός αισθητήρων καθώς και η ενσωμάτωση πιο εξελιγμένων συστημάτων, όπως τα LiDAR. Άμεση απόρροια όλων αυτών είναι η υψηλότερη ακρίβεια και η σταθερότητα των δεδομένων της πλοήγησης.

Το Scout B1-100 είναι ένα πλήρως αυτόνομο ελικόπτερο, με μέγιστο δυνατό φορτίο 18 έως 20 κιλά και αυτονομία πτήσης 90 λεπτά. Έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει το Riegl αερομεταφερόμενο LiDAR σαρωτή LMS-Q160. Ο σαρωτής αυτός ζυγίζει περίπου 4.5 κιλά και συγκριτικά με άλλους σαρωτές είναι εξαιρετικά ελαφρύς και είναι αρκετά ανθεκτικός στους κραδασμούς. Η γωνία σάρωσής του είναι 80 βαθμούς, ενώ το ποσοστό σάρωσης είναι 5 έως 60 παλμούς/δευτερόλεπτο. Σε ύψος πτήσης 50 μέτρων, μπορεί να επιτευχθεί ανάλυση 50 σημεία ανά τετραγωνικό μέτρο.

Το ελικόπτερο Geocopter GC 201 της Geocopter, μπορεί να μεταφέρει έως 30 κιλά ωφέλιμο φορτίο, μεγαλύτερο και από το Scout B1-100. Μπορεί να ενσωματώσει διάφορες συσκευές εικόνας και σάρωσης, όπως LiDAR και ψηφιακές μηχανές μεσαίου εστιακού επιπέδου. Θεωρητικά, μπορεί να πετάξει σε 4000 μέτρα από τη μέση στάθμη της θάλασσας.

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά και των δύο συστημάτων.

Πίνακας 10: Βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων της κατηγορίας L-CLASS (Eisenbeiss, 2009)

Χαρακτηριστικό	Scout B1-100	Geocopter GC 201
Ιδιαιτερότητα	Σαρωτής λέιζερ	2 μηχανές
Μήκος	3.3 μέτρα	2.9 μέτρα
Τύπος μηχανής	Πετρελαίου	Τουρμπίνα
Αριθμός στροφείων	1	1
Άνοιγμα φτερών	3.2 μέτρα	3.3 μέτρα
Ωφέλιμο φορτίο	18kg	30kg
Αυτονομία πτήσης	60min	240min

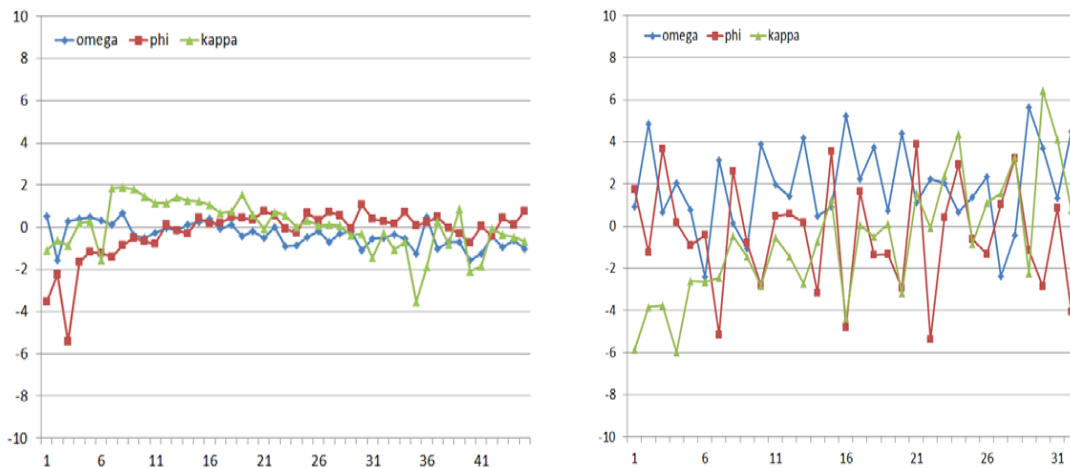
2.4.3 Ομοιότητες και διαφορές των σύγχρονων ΜΕΕΠ

Οι σύγχρονες ΜΕΕΠ ανεξάρτητα με την κατηγορία που ανήκουν, παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες, όπως:

- παρουσιάζουν την ίδια αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- έχουν τα ίδια συστήματα πλοήγησης
- δυνατότητα αυτόματης προσγείωσης
- δυνατότητα προγραμματισμού της πτήσης από νωρίτερα

Οι σημαντικότερες από τις διαφορές τους είναι:

- ο αριθμός των στροφείων
- η μέγιστη παραμονή στον αέρα (στις πλατφόρμες σταθερών πτερυγίων είναι μεγαλύτερη)
- το μέγεθος (οι πλατφόρμες πολλαπλών στροφείων είναι ελαφρύτερα και μικρότερα συστήματα)
- η δυνατότητα πλάγιων λήψεων (μόνο οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων έχουν αυτή τη δυνατότητα)
- η ταχύτητα που αναπτύσσουν (μεγαλύτερη για τις ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων)
- ο τρόπος απογείωσης
- ο απαιτούμενος χώρος απογείωσης και προσγείωσης τους (πολύ μικρότερος για τις ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων).
- η ευστάθεια (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 13, οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων έχουν μεγαλύτερη σταθερότητα και παρουσιάζουν σχετικά μικρές μεταβολές στον προσανατολισμό του άξονα λήψης).



Εικόνα 13: Οι μεταβολές του προσανατολισμού λήψης των εικόνων χρησιμοποιώντας ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων (αριστερά) και ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων (δεξιά) (Cramer, 2014)

2.5 Εγγενή Πλεονεκτήματα

Η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων πλατφορμών αποτελεί ένα από τους πιο γρήγορους και οικονομικούς τρόπους συλλογής δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, μωσαϊκών, ορθοφωτογραφιών και διανυσματικών σχεδίων. Η χρονική διάρκεια των μετρήσεων είναι πολύ μικρή και αλλά και η επεξεργασία των εικόνων είναι εύκολη, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο αυτοματοποιημένα λογισμικά, που απευθύνονται ακόμη και σε μη εξειδικευμένους χρήστες. Οι ΜΕΕΠ έχουν χαμηλό κόστος κτήσης και συντήρησης και σε κάποιες εφαρμογές αποτελούν μια οικονομική εναλλακτική. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι εκτός από την ταχύτητα και την οικονομικότητα που προσφέρουν τα συστήματα αυτά, προσφέρουν και ικανοποιητική ακρίβεια (της τάξης

του εκατοστού) στα παράγωγα τους, χάρη στις χαμηλού κόστους και υψηλής ανάλυσης ψηφιακές μηχανές και στις κάρτες μνήμης υψηλής χωρητικότητας. Αποτελούν δηλαδή, πιο προσβάσιμες, οικονομικά προσιτές και αποτελεσματικές τεχνικές που χαρακτηρίζονται από απλότητα και αξιοπιστία.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των ΜΕΕΠ σε σχέση με τα επανδρωμένα συστήματα αεροσκαφών είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους σε περιπτώσεις υψηλής επικινδυνότητας αλλά και σε δυσπρόσιτες περιοχές χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η ανθρώπινη ζωή. Τέτοιες περιπτώσεις είναι για παράδειγμα περιοχές που έχουν υποστεί κάποια φυσική καταστροφή, όπως πλημμύρες, σεισμό αλλά και ορεινές και ηφαιστειογενείς περιοχές.

Επίσης, όταν απαιτείται η αεροφωτογράφιση να γίνει σε χαμηλό υψόμετρο ή κοντά σε κάποιο αντικείμενο, δεν μπορούν να πετάξουν στελεχωμένα αεροσκάφη και είναι πιο εύκολο να δοθεί άδεια πτήσης στις ΜΕΕΠ. Ενδείκνυται επομένως για αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας με απαιτήσεις μεγάλης ακρίβειας, όπως στις αποτυπώσεις μνημείων.

2.5.1 Η ενσωμάτωση συστημάτων GPS/INS ως συγκριτικό πλεονέκτημα

Τα τελευταία συστήματα που κυκλοφορούν διαθέτουν και GPS/INS δέκτες με τους οποίους είναι δυνατός ο προσδιορισμός του σημείου λήψης των εικόνων άρα και τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων αμέσως μετά την πτήση. Μια άλλη χρησιμότητα αυτών των συστημάτων είναι ότι γνωρίζοντας την ακριβή τους θέση, εξασφαλίζεται ότι τα οχήματα διανύουν την τροχιά που καθορίστηκε κατά τον προγραμματισμό πτήσης και συνεπώς τηρούνται όλοι παράμετροι.

Με τα συστήματα αυτά είναι ενισχύεται η αυτονομία των ΜΕΕΠ, αφού δεν είναι απαραίτητη η παρουσία ναυτίλου-φωτογράφου και με τον προγραμματισμό της πτήσης εξασφαλίζεται και η πλήρης κάλυψη της περιοχής μελέτης. Ενδείκνυται επίσης σε περιπτώσεις που η περιοχή μελέτης είναι επικίνδυνη και δυσπρόσιτη. Σε περίπτωση απώλειας σήματος, οι σύγχρονες ΜΕΕΠ επιστρέφουν αυτόματα στη θέση απογειώσης. Ενισχύεται επίσης, η σταθερότητα στις λήψεις, αφού πραγματοποιούνται μικρές στροφές του άξονα λήψης, εξασφαλίζονται οι επικαλύψεις των εικόνων και το υψόμετρο πτήσης διατηρείται σταθερό.

2.6 Εγγενή μειονεκτήματα

Παρά την συνεχή εξέλιξη και βελτίωση των συστημάτων αυτών, εξακολουθούν να διαπιστώνονται αδυναμίες και μειονεκτήματα, που χρήζουν αντιμετώπισης και συνθέτουν νέα πεδία σχετικής έρευνας. Στην παράγραφο αυτή, αναλύονται τα σπουδαιότερα.

2.6.1 Βασικά μειονεκτήματα που διέπουν όλες τις ΜΕΕΠ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα συστήματα αυτά καλύπτουν το κενό μεταξύ της εναέριας και της εγγύς επίγειας Φωτογραμμετρίας. Επομένως, το φάσμα κάλυψης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο και περιορίζεται, κυρίως, από την χαμηλή οροφή πτήσης που μπορούν να εκτελέσουν. Συνηθίζεται, επίσης, οι ΜΕΕΠ να εκτελούν πτήσεις σε

πολύ χαμηλότερα υψόμετρα, από αυτά που ορίζονται στις προδιαγραφές τους, για λόγους ασφαλείας.

Οι ΜΕΕΠ αποτελούν ελαφριά συστήματα, που μπορούν να υποστηρίξουν μικρά φορτία. Ο περιορισμός του φορτίου, είναι σημαντικός παράγοντας, που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε μια εφαρμογή, αφού καθορίζει, ανάμεσα σε άλλα, τον τύπο της ψηφιακής μηχανής που μπορεί να ενσωματωθεί σε αυτά. Χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, μη μετρητικές (ερασιτεχνικές) μηχανές και σπανιότερα μετρητικές μηχανές μεσαίου εστιακού επίπεδου. Σε αντίθεση, με τις μετρητικές μηχανές, που ενδείκνυνται για φωτογραμμετρικές εφαρμογές, οι ερασιτεχνικές, δεν έχουν σταθερή και γνωστή γεωμετρία και δεν έχουν βαθμονομηθεί. Η αδυναμία αυτή όμως, αντισταθμίζεται από την δυνατότητα, αυτοβαθμονόμησης τους σε ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς και σε άλλα προγράμματα.

Οι κραδασμοί της μηχανής, συνιστούν μια από τις ατέλειες των συστημάτων αυτών, που βελτιώνεται συνεχώς με επιπρόσθετους μηχανισμούς για την ελάττωση τους. Σε συνδυασμό με άσχημες καιρικές συνθήκες, π.χ. έντονο αέρα, αυξάνεται ο κίνδυνος απόκτησης εικόνων ακατάλληλων για φωτογραμμετρική επεξεργασία. Η ποιότητα των εικόνων, εξαρτάται άμεσα από τα παραπάνω και είναι καθοριστική για την ακρίβεια των προϊόντων που θα παραχθούν. Σε περιπτώσεις όπου μέρος των εικόνων του μπλοκ είναι πολύ κουνημένες και θολές, εξαιρούνται από την επεξεργασία και επαναλαμβάνεται η φωτογράφιση στη συγκεκριμένη περιοχή.

Ο σημαντικότερος παράγοντας, που αναστέλλει τη περαιτέρω διάδοση των συστημάτων αυτών, ειδικά των αυτόνομων, είναι το ασαφές νομικό πλαίσιο που επικρατεί αναφορικά με τη χρήση τους. Θα αναλυθεί περισσότερο σε επόμενη παράγραφο.

2.6.2 Αδυναμίες των τηλεκατευθυνόμενων ΜΕΕΠ

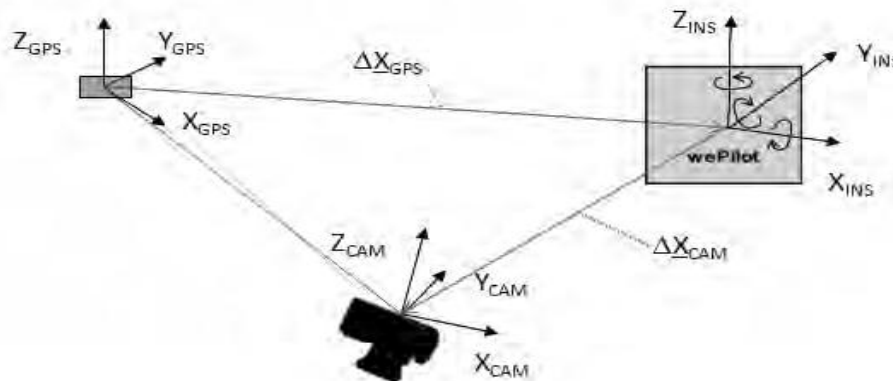
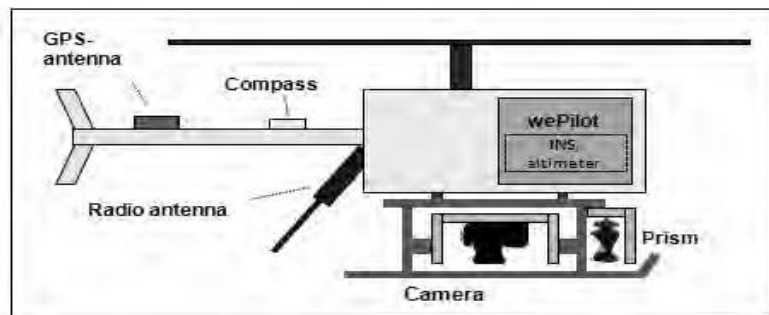
Τα βασικά μειονεκτήματα που διέπουν τη χρήση των τηλεκατευθυνόμενων ΜΕΕΠ, είναι η αυξημένη αστάθεια, η πιθανότητα ελλιπούς κάλυψης της περιοχής μελέτης και η αδυναμία διατήρησης σταθερού ύψους πτήσης.

Επιπρόσθετα, για να εξασφαλιστεί η επιτυχία της πτήσης, απαιτείται η παρουσία έμπειρου χειριστή, ναυτίλου και φωτογράφου. Ως εκ τούτου, η ακτίνα δράσης αυτών των συστημάτων είναι μικρή, προκειμένου να παραμένουν στο οπτικό τους πεδίο.

2.6.3 Αδυναμίες των αυτόνομων ΜΕΕΠ

Οι αυτόνομες ΜΕΕΠ διαθέτουν ενσωματωμένα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GPS) και αδρανειακά συστήματα (INS), τα πλεονεκτήματα των οποίων αναφέρθηκαν παραπάνω. Με τα συστήματα αυτά αυξάνεται η αυτονομία της πτήσης και η ακτίνα δράσης τους, ωστόσο, ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος να καταρριφθούν σε περίπτωση που συναντήσουν κάποιο εμπόδιο. Η διενέργεια αυτόνομης πτήσης με αποφυγή εμποδίων είναι καθοριστικής σημασίας και διεξάγονται έρευνες για την επίτευξη της.

Τα βασικά προβλήματα που αφορούν τα συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GPS) είναι η εκκεντρότητα μεταξύ της κεραίας και του προβολικού κέντρου. Οι παρατηρήσεις GPS αναφέρονται στη κεραία και όχι στο προβολικό κέντρο και απαιτείται ο προσδιορισμός του διανύσματος εκκεντρότητας (εικόνα). Υπάρχει, επίσης, χρονική διαφορά μεταξύ των μετρήσεων GPS και της λήψης των εικόνων. Επιπρόσθετες πηγές σφαλμάτων, είναι η ασάφεια φάσης και η διακοπή σήματος από τους δορυφόρους. Ιδιαίτερη προσοχή, πρέπει να δίνεται στις διορθώσεις και τους μετασχηματισμούς που απαιτούνται για τον υπολογισμό των γεωδαιτικών συντεταγμένων των σημείων λήψης (WGS84 \Rightarrow ΕΓΣΑ87).



Εικόνα 14: Εκκεντρότητα των συστημάτων αναφοράς του GPS, του INS και της Φωτογραφικής μηχανής

2.7 Νομοθεσία

Η παράγραφος αυτή επιχειρεί να συνοψίσει την κατάσταση που επικρατεί αναφορικά με την ισχύουσα νομοθεσία για τη λειτουργία των UAV στον εναέριο χώρο. Επί του παρόντος, οι κανονισμοί για την χρήση των UAV είναι είτε ασαφείς είτε ανύπαρκτοι. Ωστόσο, για την περεταίρω διάδοση τους, είναι απαραίτητη προϋπόθεση η αντιμετώπιση νομικών ζητημάτων που αφορούν την ασφάλεια, την ιδιωτική ζωή και τα δικαιώματα τρίτων. Οι διεθνείς, περιφερειακές και εθνικές ρυθμιστικές αρχές, οι κατασκευαστές, οι χειριστές και οι χρήστες πρέπει να έχουν επίγνωση των προκλήσεων που δημιουργούνται από την πλοήγηση διαφορετικού τύπου αεροσκαφών, επανδρωμένων και μη, στον εναέριο χώρο (Michaelidis-Mateou, 2014; Erotokritou, 2014). Οφείλουν να είναι κατάλληλα ενημερωμένοι για τα θέματα ασφαλείας αλλά και τις ευθύνες που προκύπτουν από αυτή τη δραστηριότητα.

Σε γενικές γραμμές, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (International Civil Aviation Organization) είναι υπεύθυνος για την έκδοση πτήσης μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων με συνολικό βάρος ανύψωσης μεγαλύτερο από 150 κιλά. Για κατηγορίες βάρους μικρότερες από 150 κιλά, έχουν την ευθύνη για αδειοδότηση οι Εθνικές Υπηρεσίες Πολιτικής Αεροπορίας (ΕΥΠΑ) του κάθε κράτους. Στις περισσότερες χώρες, δίνονται ειδικές άδειες, για τη χρήση των συστημάτων αυτών σε επιστημονικές και εμπορικές εφαρμογές από τις ΕΥΠΑ, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Παρ' όλο που αρκετές χώρες δεν αναφέρουν τα συστήματα αυτά στα νομοθετικά πλαίσια της πολιτικής αεροπορίας, έχουν αρχίσει να εκδίδονται σχετικές δημοσιεύσεις και εγκύκλιοι, που ορίζουν τις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για την χρήση τους.

Εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αρκετές χώρες έχουν αρχίσει να εκδίδουν διάφορες νομοθετικές ρυθμίσεις σχετικά με την χρήση των συστημάτων αυτών και προβλέπουν ακόμη και την επιβολή προστίμων.

Πίνακας 11: Χώρες με αρχικούς κανονισμούς (νομοθετικούς και μη)

Ευρωπαϊκή Ένωση	Γερμανία, Ιταλία, Ολλανδία, Πορτογαλία, Ρουμανία, Γαλλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Σουηδία, Δανία, Αυστρία, Πολωνία
Εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, Αυστραλία, Καναδάς, Ισραήλ, Ιαπωνία

Οι ΗΠΑ, η Αυστραλία και ο Καναδάς, λόγω της αναπτυγμένης βιομηχανίας στα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα, διαθέτουν την πιο πρόσφατη και προηγμένη νομοθεσία, συσχετίζοντας τις νομοθετικές με τις τεχνολογικές εξελίξεις (Michaelidis-Mateou, 2014; Erotokritou, 2014).

Η Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας στην Ελλάδα έχει εκδώσει το ΠΔ ΦΕΚ9Β/2010 "Κανονισμός Πτήσεων Αερομοντέλων" για UAV με μάζα λιγότερη από 25 κιλά. Είναι σε εξέλιξη η συγγραφή κανονισμού πτήσεων για UAV με μάζα από 25 έως 150 κιλά (Κούτρας, 2013).

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Με την πάροδο των χρόνων, η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων πλατφορμών εξαπλώνεται σε πληθώρα εφαρμογών. Μολονότι, ξεκίνησαν ως στρατιωτικά και κατασκοπευτικά εργαλεία, τώρα εδραιώνεται η θέση τους και σε άλλους επαγγελματικούς τομείς. Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζεται η χρησιμότητά τους σε διάφορους τομείς και παρουσιάζονται ενδεικτικές περιπτώσεις μελέτης.

3.1 Χαρτογράφηση μικρών και μεσαίων εκτάσεων

Οι ΜΕΕΠ ενδείκνυνται για τις τοπογραφικές εργασίες, λόγω των παραγώγων που μπορούν να προσφέρουν. Μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτές από ελαφριές ψηφιακές μηχανές μέχρι μηχανές μεγάλου εστιακού επιπέδου. Με κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων που θα ληφθούν, μπορούν να παραχθούν τοπογραφικοί χάρτες, ορθοφωτογραφίες, φωτομωσαϊκά, τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας και τρισδιάστατα νέφη σημείων, με μεγάλη ακρίβεια. Η εφαρμογή τους συνίσταται κυρίως σε αποτυπώσεις μικρών και μεσαίων εκτάσεων για να ικανοποιείται και ο παράγοντας της οικονομικότητας. Για τοπογραφικές αποτυπώσεις σε απομακρυσμένες, δύσκολες ή επικίνδυνες στην πρόσβαση περιοχές μπορεί να αποτελέσουν μοναδική διέξοδο. Η εξοικείωση των χρηστών και η διάδοση των ΜΕΕΠ μπορεί να αναδείξει την συνεισφορά τους και σε άλλα πεδία, όπως είναι το Κτηματολόγιο και η Πολεοδομία.

3.2 Προστασία πολιτιστικής κληρονομιάς

Στο πλαίσιο της προστασίας της πολιτιστικής κληρονομιάς διεξάγονται ενέργειες, συντήρησης, ανακατασκευής, αναστήλωσης, αποκατάστασης, ανάδειξης, εξυγίανσης και αναβίωσης. Για τις ανάγκες αυτές, η γεωμετρική τεκμηρίωση των μνημείων καθίσταται απαραίτητη και αποτελεί ένα υποσύνολο της συνολικής ολοκληρωμένης τεκμηρίωσής του. Η γεωμετρική τεκμηρίωση ιστορικών μνημείων αποτελεί σύνθετο έργο. Οι αποτυπώσεις αυτές παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες, εκ των οποίων οι βασικότερες είναι, η μεγάλη κλίμακα και η απαιτούμενη ακρίβεια.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως γεωδαιτικές και φωτογραμμετρικές, καθώς επίσης και οι σαρωτές λέιζερ χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, λόγω της δυνατότητας συλλογής μεγάλου αριθμού σημείων σε λίγο χρόνο. Η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων πλατφορμών σε αυτού του είδους αποτυπώσεις έχει δοκιμαστεί σε πολλές περιπτώσεις μνημείων σε διάφορα μέρη του κόσμου και έχει ανταποκριθεί με μεγάλη επιτυχία. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ΜΕΕΠ μπορούν να αποτελέσουν και τη μοναδική λύση.

Αξιοσημείωτη είναι η συμβολή τους σε περιπτώσεις αποτύπωσης μεγάλων και υψηλών κτιρίων, δυσπρόσιτων τοποθεσιών αλλά και κατά τη διενέργεια αρχαιολογικών ανασκαφών και αναζητήσεων. Η αρχαιολογική ανασκαφή αποτελεί μια καταστρεπτική διαδικασία και για αυτό πρέπει να εφαρμόζονται μη καταστρεπτικές μέθοδοι αρχαιολογικής διερεύνησης όπου αυτό είναι δυνατό.

Χρησιμοποιούνται ευρέως δορυφορικές απεικονίσεις, LiDAR και γεωφυσικές διασκοπήσεις, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητομετρία με στόχο την ολοκληρωμένη ερμηνεία αρχαιολογικών θέσεων. Η χρήση των ΜΕΕΠ στα συγκεκριμένα πεδία ευοδώθηκε για διάφορους λόγους, ένας εκ των οποίων είναι η οικονομικότητα σε συνδυασμό με τα διατιθέμενα μέσα. Οι σαρωτές λέιζερ εξακολουθούν να είναι ακριβοί και αντιοικονομικοί σε σχέση με άλλες μεθόδους. Συγκρίνοντας και με τα επανδρωμένα αεροσκάφη, μπορούν να δοθούν ευκολότερα οι άδειες πτήσης στις μη επανδρωμένες εναέριες πλατφόρμες. Επιπρόσθετα, η εξέλιξη των ψηφιακών μηχανών και των ειδικών φωτογραμμετρικών λογισμικών επεξεργασίας τα τελευταία χρόνια βοήθησε στην ικανοποίηση των απαιτήσεων κλίμακας και ακρίβειας, που διέπονται αυτού του είδους οι αποτυπώσεις.

3.3 Μεταλλευτική βιομηχανία- Εξορύξεις

Τα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης αποτελούν πολύτιμο εργαλείο στον τομέα της εξόρυξης και της μεταλλευτικής βιομηχανίας, για την αξιολόγηση, την καταγραφή και την εξερεύνηση της επιφάνειας του εδάφους, τον προσδιορισμό του αφαιρούμενου όγκου, του όγκου των αποθεμάτων κ.ά. Το πλεονέκτημα χρήσης των UAV έναντι των επίγειων παραδοσιακών μεθόδων είναι ότι το ερευνητικό έργο δεν πραγματοποιείται επί τόπου και συνεπώς δεν παρεμβαίνει στην διαδικασία της εξόρυξης και εξασφαλίζει τη μέγιστη ασφάλεια για τους επιθεωρητές. Αυξάνεται επομένως, η αποτελεσματικότητα, η ακρίβεια, και η ασφάλεια διατηρώντας το κόστος στο ελάχιστο. Οι εταιρείες που ασχολούνται με εκσκαφές και χωματοργικές εργασίες ξοδεύουν αρκετό χρόνο και χρήμα διεξάγοντας έρευνες με επίγειες τοπογραφικές μεθόδους, ενώ χρησιμοποιώντας εικόνες από UAVs μπορούν να γίνουν άμεσα και γρηγορότερα οι υπολογισμοί του όγκου των εκσκαφών.

3.4 Κατασκευές

Οι κατασκευαστικές εταιρείες αντιμετωπίζουν παρόμοιες δυσκολίες όσον αφορά στη βελτίωση των υποδομών. Στο σημερινό συνεχώς μεταβαλλόμενο τοπίο, οι υπηρεσίες ταχείας χαρτογράφησης αποτελούν ένα εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο για την μοντελοποίηση και το σχεδιασμό. Οδικά έργα, γέφυρες, ράμπες, κανάλια και αντιπλημμυρικά έργα, μπορούν εύκολα να ελεγχθούν εναέρια, βοηθώντας τους μηχανικούς να λάβουν τα αναγκαία προληπτικά μέτρα κατά την κατασκευή των υποδομών. Λόγω του μικρού κόστους της χρήσης των UAV, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μηνιαία ή ακόμα και εβδομαδιαία βάση, για την παρακολούθηση των εργοταξίων και των ελέγχων των εργασιών. Εισάγοντας και μετρημένα σημεία ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια, είναι δυνατή η αύξηση της ακρίβειας και η καλύτερη ερμηνεία και αξιολόγηση των τρισδιάστατων μοντέλων.

3.5 Γεωργία

Σε πολλές μη επανδρωμένες πλατφόρμες παρέχεται η δυνατότητα τοποθέτησης πολυφασματικών σαρωτών, εκτός από ψηφιακές μηχανές. Χρησιμοποιώντας τις τιμές της ορατής και της εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας, μπορεί να υπολογιστεί ο δείκτης NDVI (κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης). Με τον δείκτη NDVI μπορούν να

ανιχνευθούν διάφορα προβλήματα ή παθογένειες των φυτών, όπως για παράδειγμα η ξηρασία, που δεν είναι ανιχνεύσιμα στα ορατά μήκη κύματος. Επίσης επιτρέπεται ο σωστός σχεδιασμός για την ανάπτυξη και καλλιέργεια του εδάφους και η οπτική επιθεώρηση των καλλιεργειών και των φυτειών. Αντίστοιχα, μπορούν να εποπτευθούν και οι δασικές εκτάσεις. Συγκριτικά πλεονεκτήματα των ΜΕΕΠ έναντι της χρήσης δορυφόρων και επανδρωμένων αεροσκαφών είναι η οικονομικότητα και η υψηλότερη ανάλυση που προσφέρουν.

3.6 Γεωεπιστήμες

Η ακριβής αποτύπωση όλων των κτιρίων μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας όλα τα εργαλεία του Τοπογράφου Μηχανικού, όπως είναι οι ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί, οι σαρωτές λέιζερ, οι ψηφιακές μηχανές κ.ά. Σε περιπτώσεις όμως κάποιας φυσικής καταστροφής, όπως είναι οι σεισμοί και τα ηφαίστεια, τα μέσα αυτά έχουν σημαντικούς περιορισμούς στη χρήση τους, κυρίως λόγω προσβασιμότητας. Οι ΜΕΕΠ όμως, μπορούν να βοηθήσουν στην επιθεώρηση των περιοχών, προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα αλλά και να αντιμετωπιστούν οι φυσικές καταστροφές.

3.7 Περισσότερες εφαρμογές και αγορές εργασίας

Αξιολογή κρίνεται και η εφαρμογή του και σε άλλους τομείς δραστηριοτήτων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η περιβαλλοντική και υγειονομική ταφή των αποβλήτων, οι δημόσιες υπηρεσίες, η διαχείριση των φυσικών καταστροφών (π.χ. φωτιές και πλημμύρες) και η παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων (όπως η διάβρωση της ακτογραμμής, οι κατολισθήσεις και η αστικοποίηση).

3.8 Περιπτώσεις μελέτης

Σε αυτή την παράγραφο αναφέρονται ενδεικτικά τρεις περιπτώσεις μελέτης στις οποίες διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα των ΜΕΕΠ. Η πρώτη περίπτωση αφορά την τρισδιάστατη μοντελοποίηση της πόλης των Μάγια (Sauerbier and Eisenbeiss, 2009) και η δεύτερη μια αρχαιολογική ανασκαφή στο Μπουτάν (Sauerbier and Eisenbeiss, 2009). Στην τρίτη μελέτη, γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την ενσωμάτωση ενός ελαφριού συστήματος LiDAR σε μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης (Gianpaolo Conte, 2013).

3.8.1 Περίπτωση μελέτης στην περιοχή Copan στην Ονδούρα

Η περιοχή Copan είναι μια πόλη των Μάγια που βρίσκεται βορειοδυτικά της Ονδούρας και κοντά στα σύνορα με την Γουατεμάλα. Το μεγαλύτερο μέρος της τεκμηριώθηκε τον Απρίλιο του 2009 από το Πανεπιστήμιο ΕΤΗ της Ζυρίχης (Sauerbier and Eisenbeiss, 2009). Ο στόχος του έργου ήταν η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του οικισμού και για την επίτευξη του έγινε συνδυασμός όλων των μεθόδων και των μέσων για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

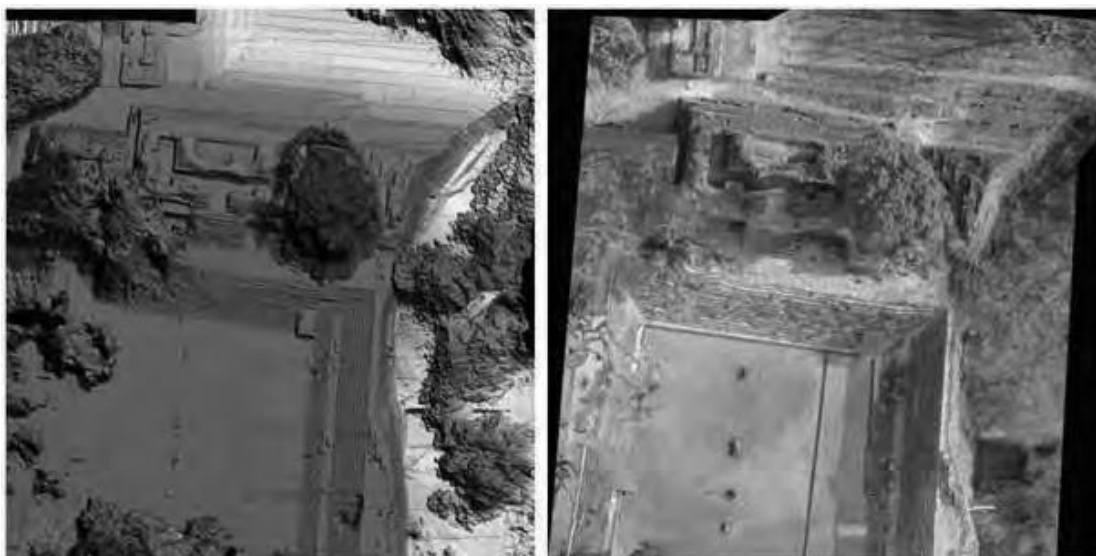
Η μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το έργο είναι το σύστημα Copter 1B, το οποίο ελέγχεται από 2 ανθρώπους και διαθέτει το σύστημα ελέγχου πτήσης wePilot1000. Η ψηφιακή μηχανή που τοποθετήθηκε σε αυτό είναι η

NikonD2X. Σε κάποια μέρη πάρθηκαν επίγειες φωτογραφίες, ενώ σε άλλα χρησιμοποιήθηκε σαρωτής λέιζερ. Λόγω χρονικών περιορισμών η χρονική διάρκεια της συλλογής των δεδομένων ήταν 2,5 μέρες. Η ΜΕΕΠ συγκεκριμένα, εκτέλεσε 2 πτήσεις, 12 και 10 λεπτών ακριβώς. Διαπιστώθηκε πως η τροχιά των πτήσεων που είχε προγραμματιστεί να εκτελέσει η ΜΕΕΠ πραγματοποιήθηκε με ακρίβεια.

Πίνακας 11: Παράμετροι προγραμματισμού των δύο πτήσεων που εκτελέστηκαν

Περιοχή	Περιοχή I	Περιοχή II
Κλίμακα αεροφωτογράφισης	1/2.500	1/5.000
Ύψος πτήσης	90m	120m
Εστιακή απόσταση	35mm	24mm
Μέγεθος εδαφοψηφίδας	1cm	3cm
Ταχύτητα πλοήγησης	3m/s	5m/s
Λειτουργία πλοήγησης	Αυτόνομη	Αυτόνομη
Μέγεθος περιοχής	200m*200m	300*200m
Κατά μήκος και κατά πλάτος επικάλυψη	75% και 75%	75% και 75%

Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν είναι ικανοποιητικά και πολλά υποσχόμενα. Οι βασικότερες δυσκολίες που παρουσιάστηκαν οφείλονταν στην βλάστηση που απέκρυβε κάποια μέρη του οικισμού, κυρίως τα σκαλοπάτια και τις γωνίες. Ο χρόνος που απαιτήθηκε για αυτά ήταν μόνο μία ημέρα, συμπεριλαμβανομένης και της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, αποδεικνύεται για άλλη μια φορά πως η συμβολή διαφόρων μεθόδων μαζί μπορεί να επιφέρει το μέγιστο αποτέλεσμα και καμία λύση δεν είναι μονοσήμαντη.



Εικόνα 14: Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας με κλίμακα 1:500 (αριστερά) και ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:100 (Sauerbier and Eisenbeiss, 2009)

3.8.2 Αρχαιολογική ανασκαφή στο Drapham Zhong στο Μπουτάν

Το Drapham Zhong αποτελεί ένα πολύπλοκο ερείπιο στην περιφέρεια του Bumthang στο κέντρο του Μπουτάν. Σύμφωνα με τις προφορικές παραδόσεις χτίστηκε τον 15^ο-16^ο αιώνα. Η αρχαιολογική ανασκαφή στο Drapham Zhong αποτέλεσε και την πρώτη αρχαιολογική εργασία που πραγματοποιήθηκε στο βασίλειο του Μπουτάν.

Τα βασικά μέρη της ανασκαφής είναι διάφοροι μικροί τοίχοι και ένας κεντρικός πύργος, που ονομάζεται Utze. Βρίσκονται στην κορυφή του λόφου μιας κοιλάδας σε ύψος 80 μέτρα και καλύπτουν μια έκταση 225μ.*100μ. Γύρω από τα μέρη αυτά, υπάρχουν πύργοι παρακολούθησης. Στην κάτω ανατολική μεριά του βραχώδους λόφου βρίσκονται και άλλα καταστραμμένα αντικείμενα. Στους πρόποδες του λόφου υπάρχουν δομές που καταδεικνύουν την ύπαρξη του οικονομικού κέντρου του κάστρου και ενός νερόμυλου. Επιπρόσθετα, υπήρχαν και οχυρωμένες σκάλες που οδηγούσαν στο κάστρο. Όλη η περιοχή της ανασκαφής βρίσκεται σε υψόμετρο 2.900 μέτρων (Grün, 2010; SLSA 2013).



Εικόνα 15: Ο λόφος με τις βασικές δομές των ερειπίων στο Drapham Zhong (Bláha, 2010; Eisenbeiss, 2010; Sauerbier, 2010; Grün, 2010)

Η τεκμηρίωση του Drapham Zhong αποτελεί συλλογικό έργο του πανεπιστημίου ETH της Ζυρίχης, του ιδρύματος αρχαιολογικής έρευνας στο εξωτερικό της Ελβετίας και του Λιχτενστάιν (SLSA) και της Helvetas. Στόχος της είναι η δημιουργία ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου των ερειπίων που δύναται να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω αρχαιολογικές εργασίες.

Το κύριο μέρος της ανασκαφής καταγράφηκε με το MD4-200 της Microdrones. Το MD4-200 είναι μη επανδρωμένη πλατφόρμα πολλαπλών στροφείων και ενδείκνυται για αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας. Λόγω του μικρού μεγέθους του είναι εύκολο

στην μεταφορά. Η ψηφιακή μηχανή που τοποθετήθηκε στο MD4-200 είναι η Panasonic DMC-FX35.



Εικόνα 16: Μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης MD4-200 της Microdrones

Ενώ διαθέτει αυτόνομη λειτουργία πτήσης, η δυνατότητα αυτή δεν ήταν διαθέσιμη κατά την συλλογή δεδομένων στο Μπουτάν και χρησιμοποιήθηκε η υποβοηθούμενη με GPS λειτουργία. Συγχρόνως, η επικάλυψη των εικόνων ελεγχόταν από τον χειριστή στον επίγειο σταθμό ελέγχου. Ο προγραμματισμός πτήσης πραγματοποιήθηκε με τις ακόλουθες παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Βασικοί παράμετροι του προγραμματισμού πτήσης στο Μπουτάν (Sauerbier and Eisenbeiss, 2010)

Περιοχή	Μπουτάν
Ύψος πτήσης H	120 μέτρα
f	4,4 χιλιοστά
Μέγεθος εδαφοψηφίδας (GSD)	4-5 εκατοστά
Ταχύτητα του UAV (v_{UAV})	2 m/s
Λειτουργία πτήσης	Υποβοηθούμενη
Τρόπος συλλογής	Κίνηση με μέτρια και σταθερή ταχύτητα
Μέγεθος περιοχής κάλυψης	350μέτρα*200 μέτρα
Κατά μήκος/ κατά πλάτος επικάλυψη (p/q)	75%/75%

Λόγω τεχνικών προβλημάτων ορισμένα μέρη της ανασκαφής δεν μπορούσαν να καταγραφούν με εναέριες λήψεις. Συγκεκριμένα, η πάνω μεριά του λόφου καταγράφηκε με το MD4-200, ενώ τα αντικείμενα στο κάτω μέρος με επίγειες εικόνες. Για τις ανάγκες όμως του απόλυτου προσανατολισμού των εικόνων (εναέριων και επίγειων) υπολογίστηκαν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες 11 επίγειων σημείων ελέγχου.

Οι κύριοι στόχοι ήταν η ανακατασκευή ορισμένων δομών των ερειπίων και η παραγωγή ορθοφωτογραφίας των βασικών ερειπίων στη κορυφή του λόφου. Από την επεξεργασία των UAV εικόνων προέκυψαν 3 ορθοφωτογραφίες και ένας χάρτης της περιοχής.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των UAV εικόνων είναι: η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής, ο προσανατολισμός των εικόνων, η εξαγωγή ΨΜΕ και η παραγωγή ορθοεικόνας. Η βαθμονόμηση της Panasonic DMC-FX35 έγινε μέσω ειδικών στόχων και του λογισμικού i-Witness. Ο προσανατολισμός των εικόνων επιτεύχθηκε με το λογισμικό της Leica Photogrammetric Suite 9.2 (LPS). Μετά τον προσανατολισμό των εικόνων είναι δυνατή η παραγωγή του ΨΜΕ. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAT-PP (sattellite image precision processing). Το κύριο στοιχείο του SAT-PP είναι ένας αλγόριθμος αντιστοίχισης, με τον οποίο μετρώνται ενδεικτικά σημεία στην επικαλυπτόμενη περιοχή από διαφορετικές θέσεις. Η αρχή αυτής της πολυεικονικής διαδικασίας βασίζεται στην ελαχιστοτετραγωνική μέθοδο. Για λόγους ακρίβειας και αξιοπιστίας εφαρμόστηκαν πρόσθετοι γεωμετρικοί περιορισμοί. Όλα τα ΨΜΕ που παρήχθησαν από τις εικόνες εισήχθησαν στο Geomagic Studio 9 προκειμένου να επιλεγθούν τα καλύτερα κομμάτια από το κάθε ΨΜΕ και να ενοποιηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε ένα. Στην συνέχεια με βάση τις προσανατολισμένες εικόνες και το ΨΜΕ γίνεται η παραγωγή των 3 ορθοφωτομωσαϊκών και του ορθοφωτοχάρτη με την βοήθεια του LPS Mosaic Tool.



Εικόνα 17: Ορθοφωτογραφία της περιοχής του Drapham Zhong βασισμένη σε UAV εικόνες και σε ΨΜΕ που δημιουργήθηκε αυτόματα και ορθοφωτογραφία της περιοχής του Drapham Zhong βασισμένη σε UAV εικόνες και σε ΨΜΕ (ψηφιακό που δημιουργήθηκε χειροκίνητα (Bláha, 2010; Eisenbeiss, 2010; Sauerbier, 2010; Grün, 2010))

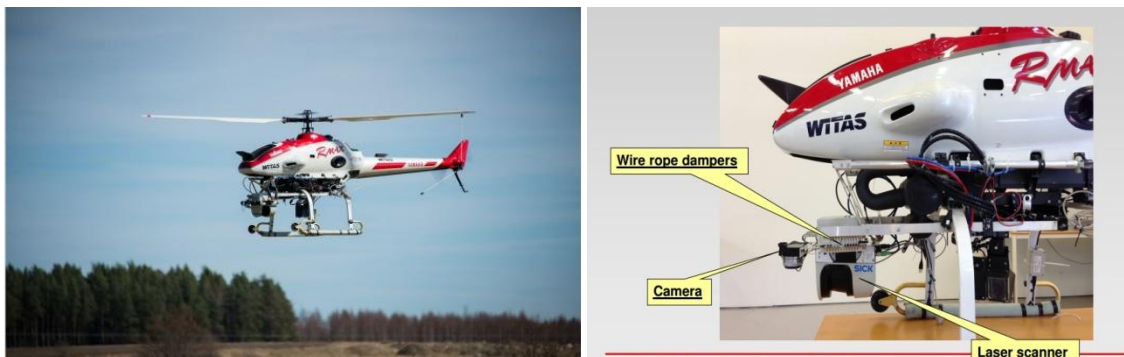
Συγκρίνοντας τις δύο ορθοφωτογραφίες, είναι φανερή η βελτίωση της δεύτερης, ύστερα από την χειροκίνητη διόρθωση του ΨΜΕ. Διαπιστώνεται επίσης, πως η διαδικασία επεξεργασίας των UAV εικόνων για την παραγωγή ορθοφωτογραφίας και ορθοφωτοχάρτη ακολουθεί την λογική της παραδοσιακής Φωτογραμμετρίας και τα παράγωγα τους είναι υψηλής ποιότητας.

3.8.3 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από την ενσωμάτωση ενός ελαφριού συστήματος LiDAR σε μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα

Ο Gianpaolo Conte (2013) παρουσιάζει ένα χαμηλού κόστους και ελαφρύ αερομεταφερόμενο σύστημα χαρτογράφησης. Το αερομεταφερόμενο σύστημα LiDAR συνοδεύεται με ένα υψηλής ακρίβειας δέκτη GNSS, μια αδρανειακή μονάδα μέτρησης (MEMS) και μια μαγνητική πυξίδα, προκειμένου να υπολογιστεί το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας. Οι στόχοι της έρευνας του είναι: η αξιολόγηση του συγκεκριμένου εναέριου συστήματος χαρτογράφησης που βασίζεται στους αισθητήρες LiDAR και MEMS (μικροηλεκτρονικομηχανικό σύστημα) και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του αερομεταφερόμενου σαρωτή LiDAR και ενός φωτογραμμετρικού συστήματος.

Η δυνατότητα καταγραφής σε άσχημες καιρικές συνθήκες (όπως χιόνι ή ομίχλη), η 24ώρη λειτουργία τους, η άμεση συλλογή τρισδιάστατης πληροφορίας και η καλή υψομετρική ακρίβεια είναι τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των LiDAR και αποτελούν κίνητρα για την ενσωμάτωση των δεκτών αυτών σε εναέριους μηχανισμούς και δει μη επανδρωμένους.

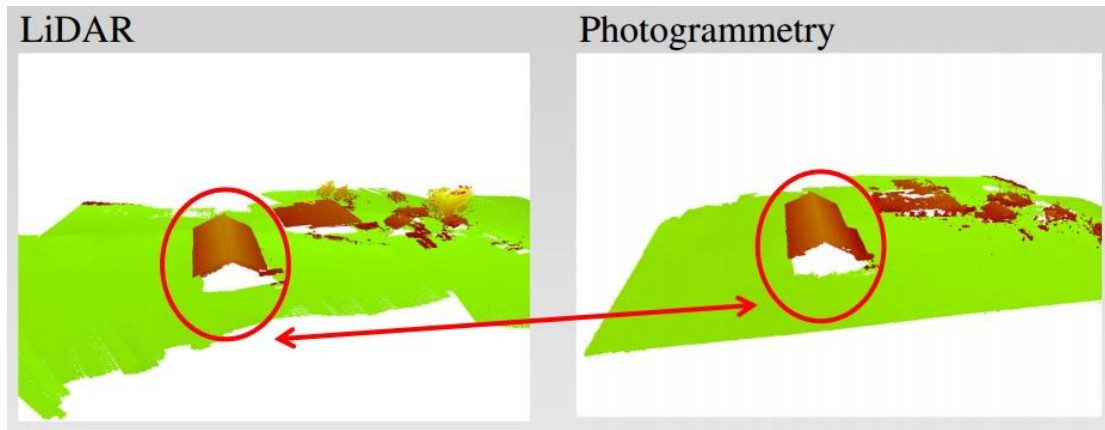
Ο αερομεταφερόμενος σαρωτής LiDAR και η ψηφιακή μηχανή τοποθετήθηκαν σε μη επανδρωμένο ελικόπτερο με μέγιστο βάρος ανύψωσης μέχρι 100kg. Η διάμετρος της μηχανής είναι 3,4 μέτρα. Η γωνία σάρωσης του LiDAR είναι 90 βαθμοί και η μέγιστη γωνιακή ανάλυση 0,6 βαθμοί. Η πυκνότητα συλλογής σημείων είναι 50point/sqm. Η έκταση της περιοχής μελέτης είναι 1,6ha. Το ύψος πτήσης της ΜΕΕΠ είναι 45 μέτρα και η ταχύτητα πλοήγησης 3m/s. Χρησιμοποιήθηκαν 3 λωρίδες πτήσης.



Εικόνα 18: Ο αερομεταφερόμενος σαρωτής LiDAR και η ψηφιακή μηχανή τοποθετημένα στο μη επανδρωμένο ελικόπτερο RMAX της YAMAHA (Gianpaolo Conte, 2013)

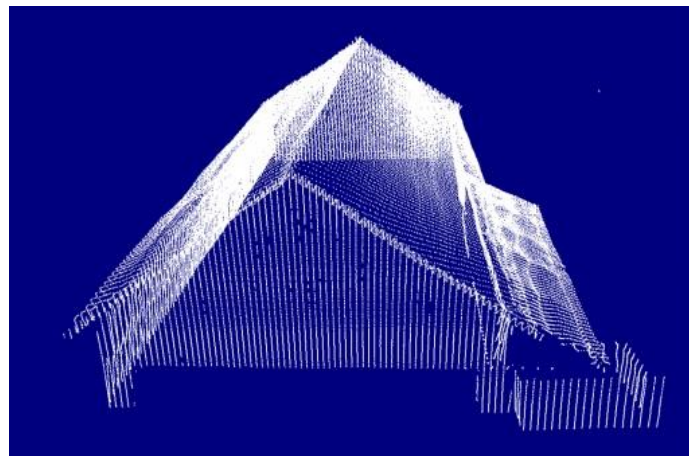
Για τη φωτογραμμετρική συλλογή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή μηχανή Sony NEX-7. Οι διαστάσεις του εστιακού επιπέδου είναι $23,5 \times 15,6 \text{ mm}^2$ και η εστιακή απόσταση του φακού είναι ίση με 16mm. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι 2,5cm. Η κατά μήκος επικάλυψη των εικόνων ήταν 86% και η πλάγια επικάλυψη 40%. Συλλέχθηκαν συνολικά 73 εικόνες. Η γεωαναφορά τους πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις μετρήσεις θέσης του συστήματος RTK GNSS χωρίς επίγεια σημεία ελέγχου. Για την επεξεργασία τους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PIX4UAV.

Στην Εικόνα 19 φαίνονται ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που παρήχθησαν και στις δύο περιπτώσεις. Διαπιστώνεται πως και τα δύο ΨΜΕ έχουν ελλείψεις και δεν έχουν αποτυπωθεί όλα τα μέρη του σπιτιού. Επίσης, το φωτογραμμετρικό μοντέλο έχει λίγο περισσότερο θόρυβο και δεν έχει αποτυπώσει καλά την βλάστηση. Ενδεχομένως, οι επικαλύψεις των εικόνων να μην ήταν αρκετές.



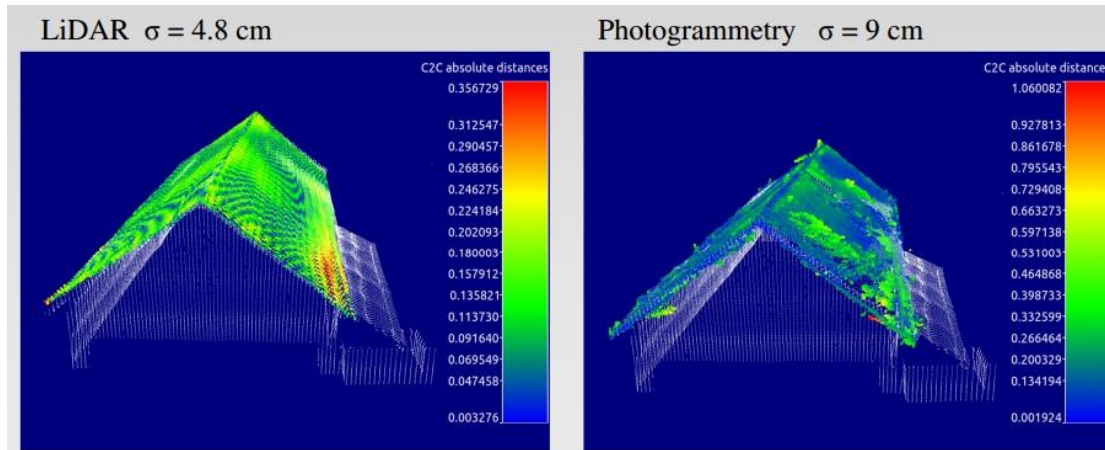
Εικόνα 19: Ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας από τον αερομεταφερόμενο σαρωτή LiDAR και το φωτογραμμετρικό σύστημα (Gianpaolo Conte, 2013)

Για την αξιολόγηση των νεφών σημείων που παρήχθησαν και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο αναφοράς, το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας που δημιουργήθηκε από επίγειες σαρώσεις LiDAR.



Εικόνα 20: Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας του υπόστεγου που δημιουργήθηκε από επίγειες σαρώσεις LiDAR (Gianpaolo Conte, 2013)

Στην Εικόνα 21, φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο νέφων σημείων στο πρόγραμμα CloudCompare. Η απόκλιση του νέφους που δημιουργήθηκε με το αερομεταφερόμενο σύστημα LiDAR από το νέφος αναφοράς κυμαίνεται στα 10 εκατοστά. Αντίστοιχα, η απόκλιση του νέφους που δημιουργήθηκε με την φωτογραμμετρική μέθοδο κυμαίνεται από τα 10 έως τα 30 εκατοστά. Ωστόσο, μπορεί το νέφος από το LiDAR να έχει μικρότερο θόρυβο από το αντίστοιχο φωτογραμμετρικό, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερα συστηματικά σφάλματα.



Εικόνα 21: Απόκλιση μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου αναφοράς και των ψηφιακών μοντέλων που δημιουργήθηκαν με τις μεθόδους που εξετάζονται. Οι τιμές που απεικονίζονται στη δεξιά χρωματική κλίμακα είναι σε μέτρα (Gianpaolo Conte, 2013)

Συνοψίζοντας, τα χαμηλού κόστους συστήματα LiDAR και οι αισθητήρες MEMS IMU μπορούν να πετύχουν ακρίβεια εκατοστού στην παραγωγή ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας με σχετικά εύκολη επεξεργασία. Οι αερομεταφερόμενοι σαρωτές LiDAR έχουν το πλεονέκτημα σε κακές καιρικές συνθήκες. Όμως, απαιτείται η ακριβής βαθμονόμηση του συστήματος για να μειωθούν τα συστηματικά σφάλματα (Gianpaolo Conte, 2013).

4. ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ UAV

Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζονται οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τη φωτογραμμετρική αξιοποίηση των εικόνων UAV. Αποτελεί την πρακτική διερεύνηση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης. Αρχικά, γίνεται αναφορά στη ροή των εργασιών που ακολουθείται για την αποτύπωση μιας περιοχής μελέτης. Περιγράφεται η διαδικασία προγραμματισμού της πτήσης των συστημάτων αυτών μέσω ειδικών λογισμικών προσομοίωσης και σχεδιασμού πτήσης. Επίσης, παρατίθεται η σύγκριση των τρόπων πλοήγησης των ΜΕΕΠ. Στη συνέχεια, αναλύεται η φωτογραμμετρική επεξεργασία στο λογισμικό Photoscan των δεδομένων που προέρχονται από τις εργασίες του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας για την υποστήριξη της αρχαιολογικής ανασκαφής στον οικισμό των Βασιλικών στον αρχαιολογικό χώρο της Κυμισάλας στη Ρόδο (Acevedo et al. 2013). Στο πλαίσιο του Διεθνούς Θερινού Σχολείου HERICT2013, στο πλαίσιο χρηματοδότησης Erasmus, συλλέχθηκαν εικόνες από ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων και σταθερών πτερυγίων. Με την κατάλληλη φωτογραμμετρική επεξεργασία, παρήχθησαν ορθοφωτογραφίες, ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας και τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα, έχοντας ως στόχο την αξιολόγηση και την μεταξύ τους σύγκριση.

4.1 Ροή εργασιών

Η ροή των εργασιών για την αποτύπωση μιας περιοχής χρησιμοποιώντας μη επανδρωμένα συστήματα χαρτογράφησης, είναι παρόμοια με αυτή των επανδρωμένων εναέριων συστημάτων.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής ανάλογα με την εφαρμογή είναι (Σκαρλάτος, 2012):

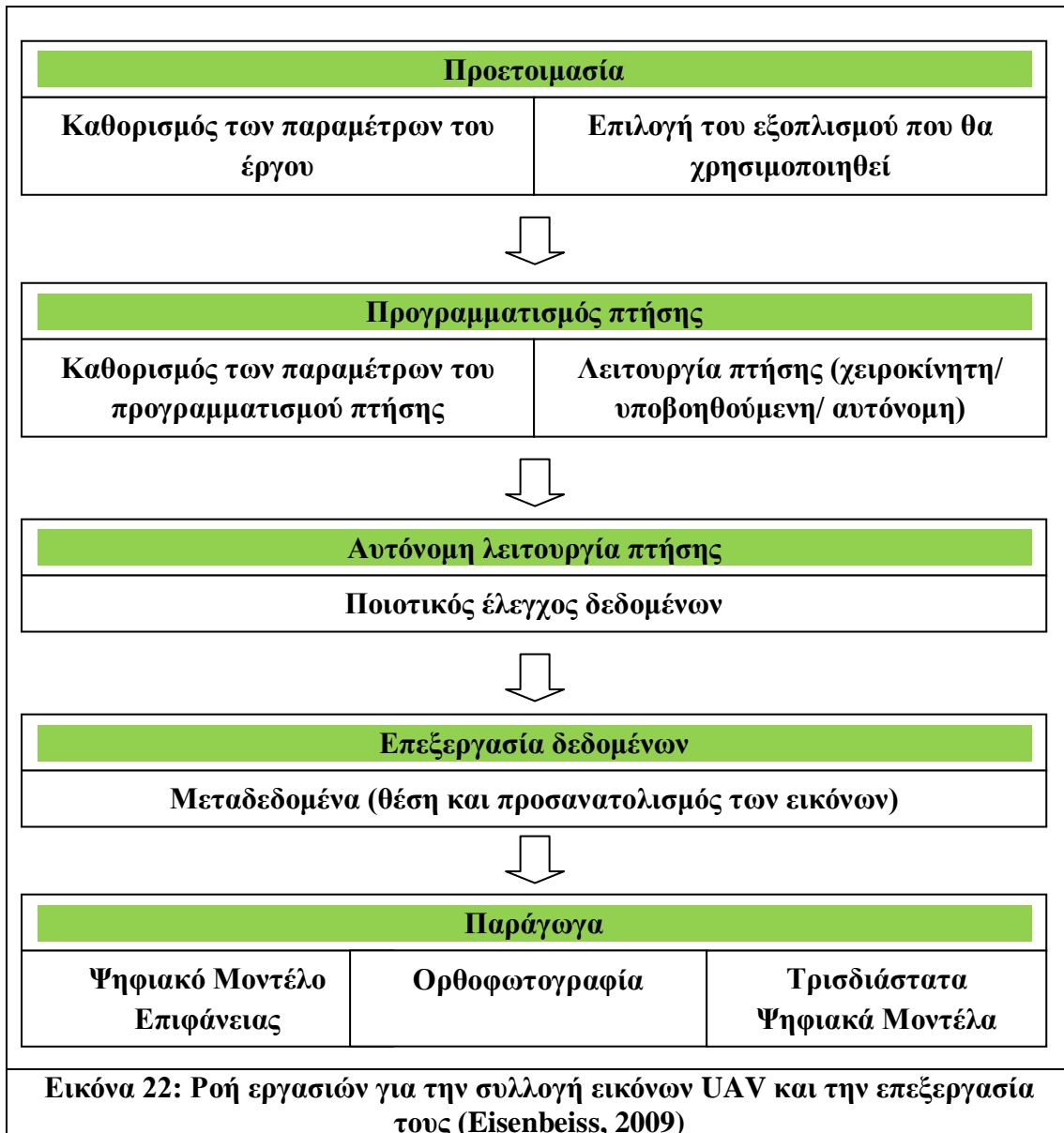
- η ακτίνα δράσης και η αυτονομία σε χρόνο
- η επιλογή του φορτίου και οι αισθητήρες
- η ταχύτητα
- η αντοχή στον άνεμο και η ευστάθεια
- ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ των λήψεων
- η δυνατότητα πλήρως αυτόνομης πτήσης και η ακρίβεια στην λήψη
- το μέγιστο ύψος πτήσης
- η μέγιστη κάλυψη
- ο απαιτούμενος χώρος για απογείωση και προσγείωση
- η επικινδυνότητα
- οι κανονισμοί αεροπλοΐας.

Δευτερεύοντα κριτήρια επιλογής είναι (Σκαρλάτος, 2012):

- ο ελάχιστος χρόνος για απογείωση
- το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης
- το επίπεδο επεξεργασίας των δεδομένων
- το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων
- η επιλογή μεταξύ ηλεκτροκινητήρα ή καυσίμου

- η συντήρηση και η διαθεσιμότητα των ανταλλακτικών
- η εκμάθηση και το προσωπικό
- η ευκολία μεταφοράς.

Στην Εικόνα 22, περιγράφονται τα βασικά της βήματα. Σημαντική ενέργεια μετά την εκτέλεση της πτήσης, αποτελεί ο ποιοτικός έλεγχος των δεδομένων. Στο στάδιο αυτό ελέγχονται τα σημεία λήψης των εικόνων καθώς και η κάλυψη της περιοχής μελέτης, ώστε σε περίπτωση που διαπιστωθούν τυχόν λάθη ή ελλείψεις να επαναληφθεί η πτήση.



4.2 Προγραμματισμός πτήσης

Ο προγραμματισμός πτήσης αποτελεί σημαντικό τμήμα της φωτογραμμετρικής διαδικασίας. Για τον καθορισμό των παραμέτρων του, λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες που αφορούν στο έργο, όπως ο σκοπός, η κλίμακα και η απαιτούμενη

ακρίβεια απόδοσης, η οικονομικότητα κ.ά. Ειδικά, στα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης, πρέπει να συνεκτιμώνται και άλλοι παράγοντες όπως, οι καιρικές συνθήκες, τυχόν εμπόδια που μπορεί να παρουσιαστούν και η ισχύουσα νομοθεσία στην εκάστοτε περιοχή μελέτης.

Τα πιο συνηθισμένα βασικά σενάρια αποτύπωσης που μπορούν να παρουσιαστούν είναι τα εξής:

- Περιοχή χωρίς ανάγλυφο
- Περιοχή με έντονο ανάγλυφο
- Τρισδιάστατη αποτύπωση ενός κτιρίου ή ενός μνημείου.

Ο προγραμματισμός πτήσης διαφέρει ανάλογα με το σενάριο. Οι σημαντικότερες παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν κατά τον προγραμματισμό της πτήσης είναι η κλίμακα αεροφωτογράφισης, το ύψος πτήσης, η κατά μήκος επικάλυψη και η πλάγια επικάλυψη. Βασικά εργαλεία για τον προγραμματισμό της πτήσης και την αυτόνομη λειτουργία πλοήγησης είναι τα φωτογραμμετρικά συστήματα προσομοίωσης της πτήσης, όπως το mdCockpit και το wePilot 1000 που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Η λήψη των εικόνων εκτελείται με τους εξής τρόπους:

- αυτόματα όταν το αεροσκάφος βρεθεί στις προκαθορισμένες θέσεις, που εντοπίζονται μέσω των συστημάτων δορυφορικού εντοπισμού (GPS),
- αυτόματα αφού ο χρήστης έχει ρυθμίσει ένα σταθερό χρονικό βήμα μεταξύ των λήψεων,
- χειροκίνητα χρησιμοποιώντας ζωντανή σύνδεση της εικόνας με τον επίγειο σταθμό ελέγχου και
- με αιώρηση πάνω από το σημείο μέχρι να επιτευχθεί η ζητούμενη ακρίβεια.

Μετά την ολοκλήρωση της πτήσης, είναι διαθέσιμα στον χρήστη τα μεταδεδομένα, τα οποία καταγράφουν είτε τις θέσεις και τις στροφές κατά την στιγμή της λήψης είτε τον χρόνο λήψης κάθε εικόνας.

4.2.1 Συστήματα προγραμματισμού πτήσης

Η εταιρεία Microdrones αναβάθμισε το τετρακόπτερο MD4-200 με ένα σύστημα έλεγχου πτήσης, που επιτρέπει την αυτόνομη πτήση δίνοντας μια προκαθορισμένη τροχιά. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, μαγνητόμετρο, βαρόμετρο, υγρόμετρο, θερμομόμετρο, συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS) και ένα πακέτο λογισμικού. Το λογισμικό mdCockpit, περιέχει προσομοίωση πτήσης, επεξεργασία της τροχιάς με τη βοήθεια σημείων και ένα εργαλείο για την ανάλυση των παραμέτρων μετά την πτήση.



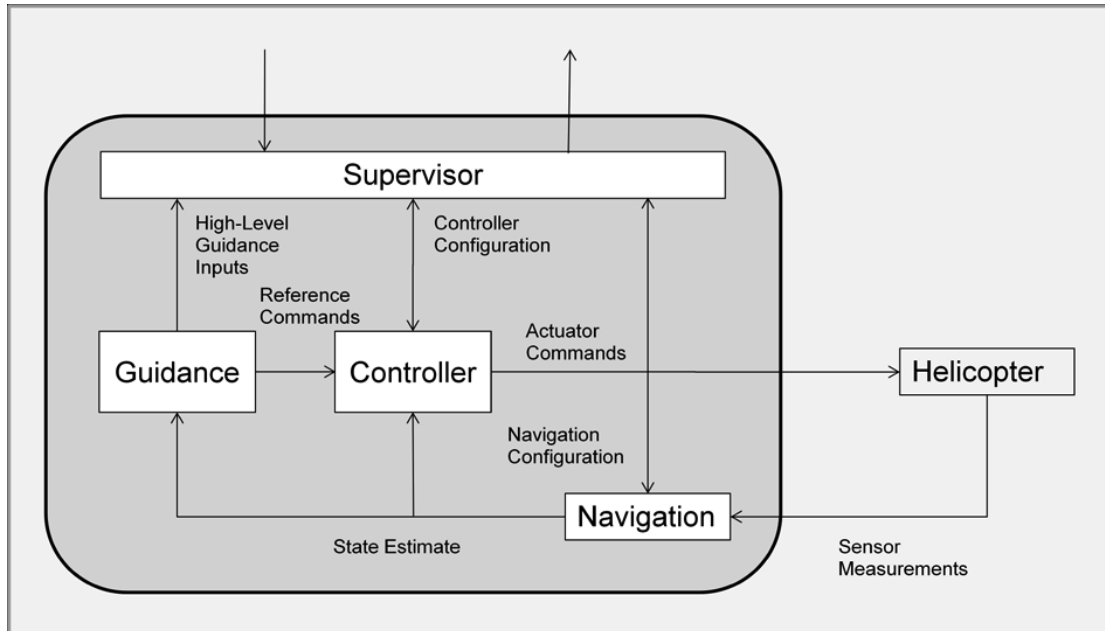
Εικόνα 23: Απεικόνιση του λογισμικού προσομοίωσης πτήσης της εταιρείας **Microdrones**

Το πρόγραμμα επεξεργασίας της τροχιάς ορίζει τα σημεία λήψης των φωτογραφιών με τη βοήθεια ενός χάρτη ή μιας ορθοφωτογραφίας. Είναι αναγκαίο να οριστούν η θέση των σημείων στο χάρτη και το ύψος πτήσης. Επιπρόσθετα, ορίζονται τα εξής: το αζιμούθιο και η ζενίθια γωνία της θέσης λήψης, η οριζόντια και η κάθετη ταχύτητα και η ταχύτητα εκτροπής πορείας. Καθορίζονται επίσης, η εστίαση της κάμερας, το χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων και ο τρόπος λήψης των εικόνων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου πτήσης wePilot1000 που προορίζεται για επαγγελματικές εφαρμογές. Παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

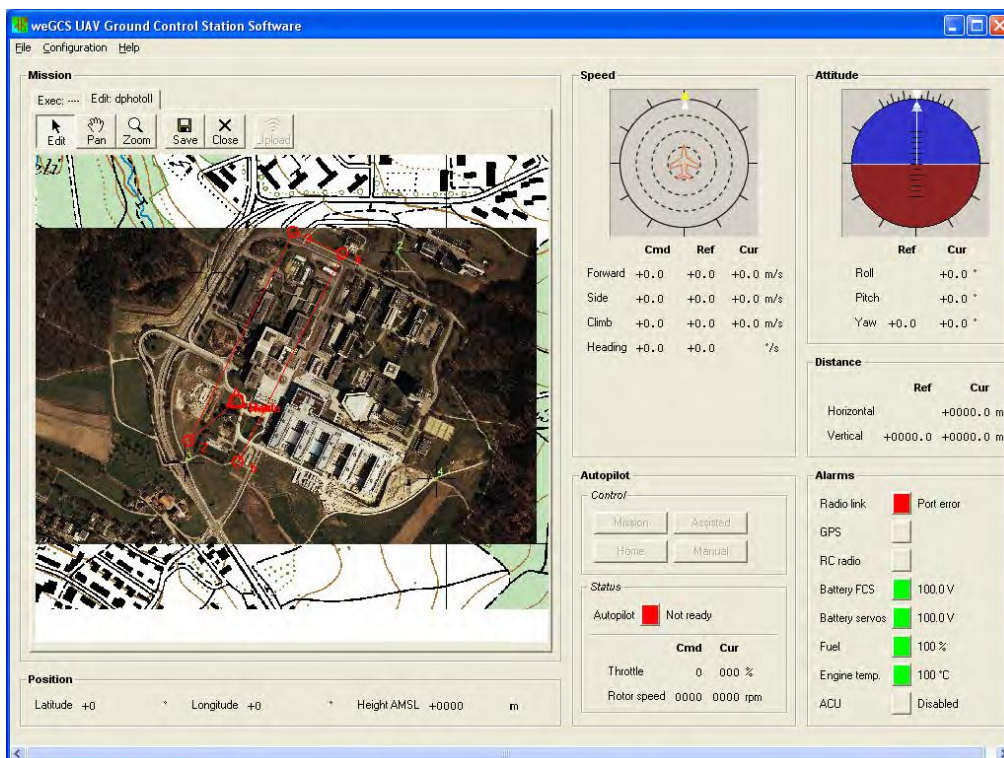
- σταθεροποίηση υψομέτρου και έλεγχο ταχύτητας
- ολοκληρωμένο σύστημα GPS/INS
- βαρομετρικό αλτίμετρο
- πυξίδα
- ενσωματωμένο καταγραφέα δεδομένων με δυνατότητα αλτιμετρίας
- προγραμματισμένο υλικό για ταχεία προσαρμογή
- λογισμικό ελέγχου πτήσης weGCS
- ενσωματωμένο σύστημα υπολογιστή

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα ελέγχου του συστήματος με τη βοήθεια ενός χειριστηρίου ή με τις γεωγραφικές συντεταγμένες των σημείων ή συνδυάζοντας και τις δύο λειτουργίες, προκειμένου να διακόψει, να τροποποιήσει ή να συνεχίσει την πτήση.



Εικόνα 24: Διάγραμμα ροής του συστήματος ελέγχου πτήσης (Eisenbeiss, 2009)

Το σύστημα ελέγχου πτήσης μπορεί να σταθεροποιήσει την πλατφόρμα ακόμη και σε περιπτώσεις έντονων ανέμων και παρέχει επίσης εξαρτήματα ασφαλείας σε περίπτωση διακοπής της επικοινωνίας. Η ικανότητα σταθεροποίησης βοηθάει στην φωτογράφιση, στη βιντεοσκόπηση και στις νυχτερινές λήψεις. Το λογισμικό του επίγειου σταθμού ελέγχου είναι παρόμοιας λειτουργίας με αυτό της microdrones του md4-200.



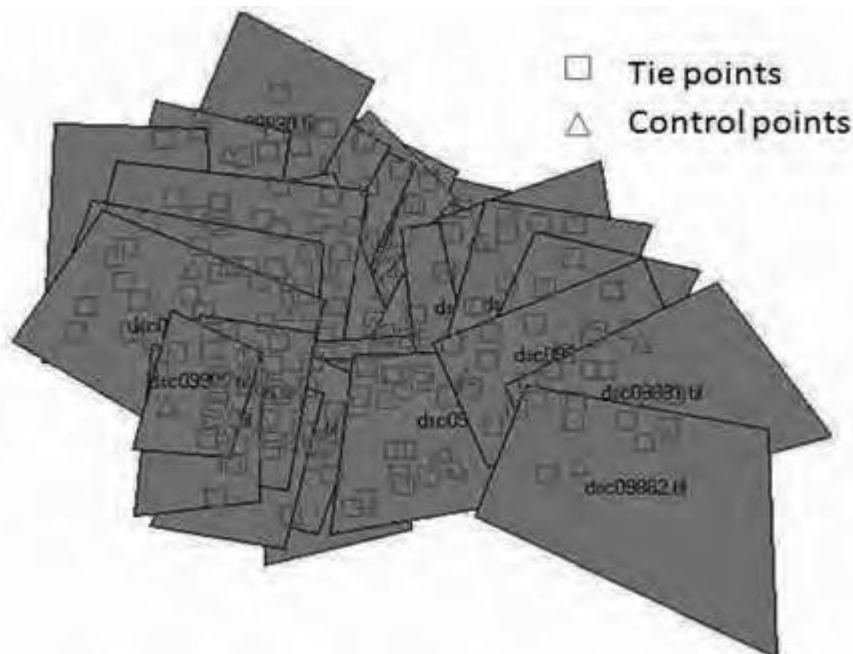
Εικόνα 25: Απεικόνιση του λογισμικού προσομοίωσης πτήσης του WePilot1000

Εισάγονται σημεία πτήσης και σημεία στάσης. Σε κάθε λωρίδα είναι αναγκαίο να οριστεί το πρώτο και το τελευταίο σημείο αλλά και η βάση λήψης των εικόνων. Με την βοήθεια του σημείου εκκίνησης ξεκινάει η αποστολή χωρίς να είναι γνωστές οι ακριβείς τρισδιάστατες συντεταγμένες του. Πολύ σημαντικό είναι και ο ορισμός ενός σημείου, όπου εάν χαθεί η σύνδεση με το ελικόπτερο, αυτό θα κατευθύνεται αυτόματα προς τα εκεί όταν ξεπεραστούν τα 30 δευτερόλεπτα.

4.2.3 Σύγκριση των λειτουργιών πλοήγησης των ΜΕΕΠ

Ο τρόπος πλοήγησης των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης επηρεάζει την σταθερότητά τους και συνεπώς τον προσανατολισμό των εικόνων που συλλέγονται. Τα τελευταία χρόνια, κυριαρχεί η τάση της αυτόνομης λειτουργίας πλοήγησης. Η αυτόνομη λειτουργία είναι καταλληλότερη για την συλλογή δεδομένων που πρόκειται να αξιοποιηθούν φωτογραμμετρικά. Επίσης, η τροχιά της πτήσης μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη και σε έντονες συνθήκες ανέμου.

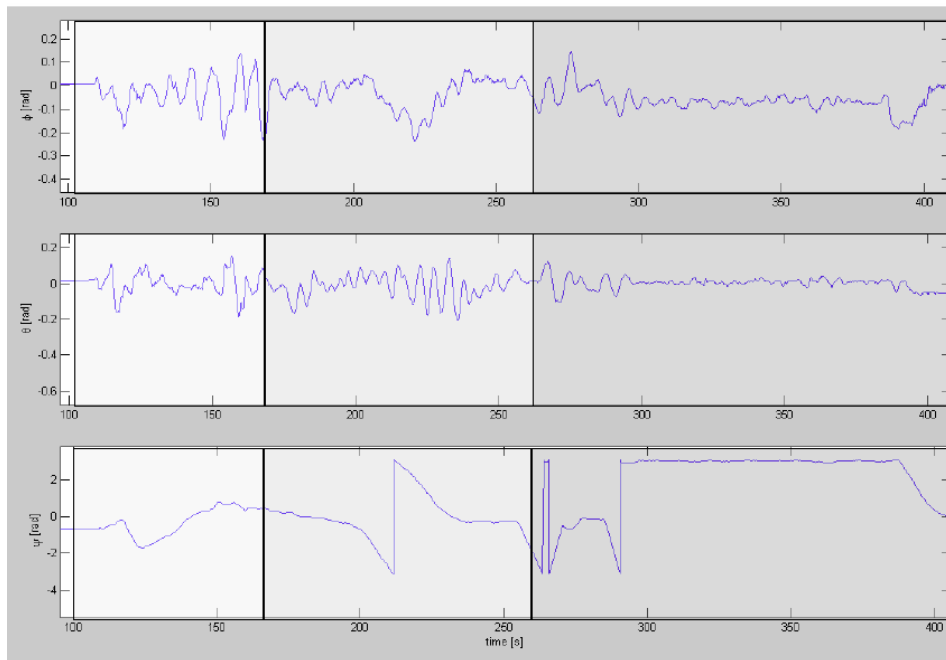
Στην εικόνα 5, παρουσιάζεται ένα μπλοκ εικόνων που έχει συλλεχθεί με έναν μηχανοκίνητο σύστημα αετού χρησιμοποιώντας την χειροκίνητη λειτουργία πλοήγησης. Σημειώνεται μεγάλη αστάθεια του συστήματος, με αποτέλεσμα, να διαφοροποιείται ο προσανατολισμός και το σχήμα των εικόνων. Η κατανομή των εικόνων είναι ακανόνιστη και η περιοχή κάλυψης δεν είναι σταθερή μεταξύ γειτονικών εικόνων.



Εικόνα 26: Παράδειγμα κάλυψης λήψης με χειροκίνητη λειτουργία (Eisenbeiss, 2009)

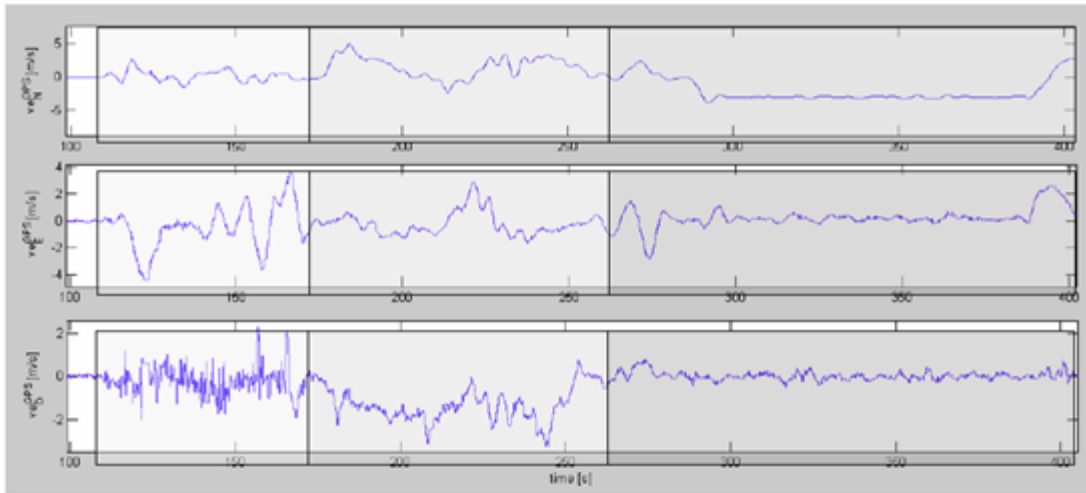
Οι εικόνες 6 και 7 δείχνουν τις γωνίες στροφής και τις ταχύτητες, μετρημένες από συστήματα GPS και INS, και στους 3 τρόπους πλοήγησης. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα σταθερών πτερυγίων Copter 1B και το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης wePILOT 1000. Στα διαγράμματα, διακρίνονται 3 φάσεις. Η απογείωση του

συστήματος πραγματοποιήθηκε χειροκίνητα. Στη συνέχεια, η αλλαγή μεταξύ της χειροκίνητης λειτουργίας σε μερικώς υποβοηθούμενη, αποτυπώνεται στην κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας. Κατά την μετάβαση αυτή, παρατηρείται μικρή βελτίωση στη διακύμανση των γωνιών στροφής και της ταχύτητας. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρείται μεγάλη αστάθεια.



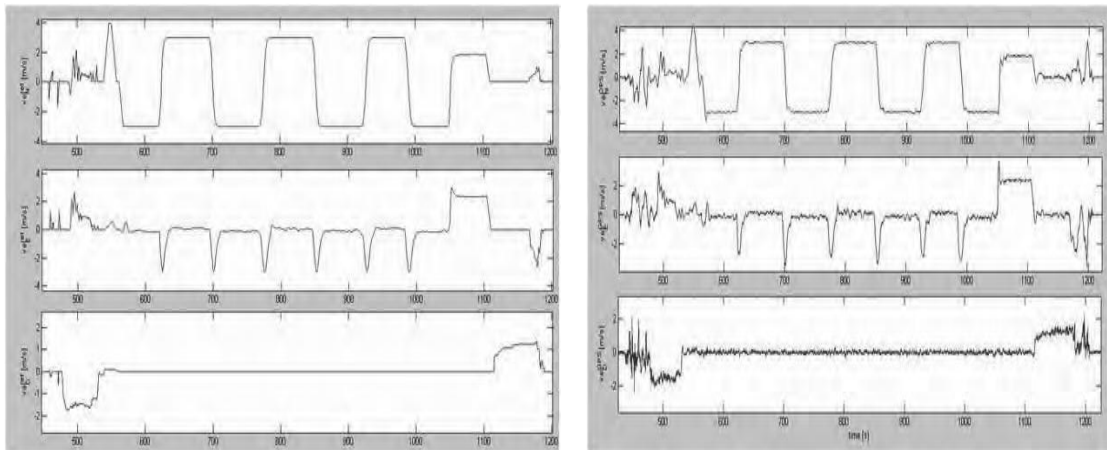
Εικόνα 27: Παράδειγμα της μετάβασης μεταξύ της χειροκίνητης, της μερικώς υποβοηθούμενης και της αυτόνομης λειτουργίας πλοήγησης. Πάνω γράφημα: Γωνία στροφής ω γύρω από τον άξονα x; Μεσαίο γράφημα: Γωνία στροφής ϕ γύρω από τον άξονα y; Κάτω γράφημα: Γωνία στροφής κ γύρω από τον άξονα z (Eisenbeiss, 2009)

Κατά την αυτόνομη λειτουργία πτήσης οι γωνίες στροφής ήταν αρκετά σταθερές. Οι διακυμάνσεις των γωνιών ω και ϕ έχουν εύρος 2 μοίρες, ενώ η γωνία κ λιγότερο από 1 μοίρα. Τα αποτελέσματα αυτά, πραγματοποιήθηκαν σε φυσιολογικές συνθήκες ανέμου.



Εικόνα 28: Παράδειγμα της μετάβασης μεταξύ της χειροκίνητης, της μερικώς υποβοηθούμενης και της αυτόνομης λειτουργίας πλοήγησης. Πάνω γράφημα: Ταχύτητα v_N ; Μεσαίο γράφημα: Ταχύτητα v_E ; Κάτω γράφημα: Ταχύτητα v_D (Eisenbeiss, 2009)

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζονται οι ταχύτητες σχεδιασμού και οι ταχύτητες εκτέλεσης μια πτήσης στην περιοχή του Coran. Η πλοήγηση του συστήματος έγινε αρχικά χειροκίνητα και στη συνέχεια με μερική υποβοήθηση. Στο μεγαλύτερο μέρος της πτήσης το σύστημα ήταν σε αυτόνομη λειτουργία. Η μετάβαση μεταξύ της χειροκίνητης και της μερικώς υποβοηθούμενης λειτουργίας, φαίνεται ξεκάθαρα εστιάζοντας στην κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας. Παρατηρώντας τα διαγράμματα, διαπιστώνεται, πως οι ταχύτητες σχεδιασμού συμπίπτουν με τις ταχύτητες εκτέλεσης.



Εικόνα 29: Ταχύτητες σχεδιασμού (αριστερά) και ταχύτητες εκτέλεσης (δεξιά) μιας πτήσης στο Coran (Eisenbeiss, 2009)

Τα παραπάνω αποτελέσματα, δείχνουν ξεκάθαρα τις διαφορές μεταξύ της χειροκίνητης, της μερικώς υποβοηθούμενης και της αυτόνομης λειτουργίας των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης.

4.3 Προεπεξεργασία εικόνων UAV

Για την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των εικόνων που έχουν συλλεχθεί με μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης προτείνονται κάποιιοι κανόνες κατά τη διαδικασία λήψης τους:


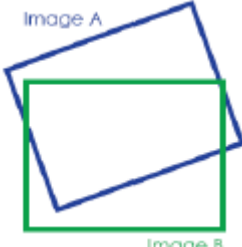

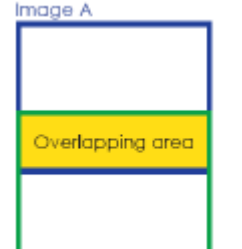
- Η ευαισθησία ISO να έχει μικρή τιμή, διότι υψηλές τιμές ISO αυξάνουν το θόρυβο στην εικόνα.
- Η τιμή του διαφράγματος να είναι μεγάλη. Όσο το διάφραγμα κλείνει, τόσο το βάθος πεδίου μεγαλώνει.
- Η ταχύτητα του κλείστρου δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλη, γιατί μπορεί να προκύψουν θολές εικόνες που να οφείλονται σε μικρομετακινήσεις. Επίσης, όσο αυξάνει η ταχύτητα λήψης, τόσο μικραίνει ο χρόνος έκθεσης.
- Οι εικόνες να έχουν τη μέγιστη δυνατή ανάλυση.

Στη συνέχεια, μετά την λήψη των εικόνων πρέπει να γίνει έλεγχος και η επιλογή των κατάλληλων για φωτογραμμετρική επεξεργασία. Τα κριτήρια για την επιλογή τους είναι η φωτεινότητα, ο προσανατολισμός τους και η επικαλυπτόμενη περιοχή. Η προσεχτική επιλογή των εικόνων είναι πολύ σημαντική για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Ως εκ τούτου οι επιλεγμένες εικόνες πρέπει να είναι φωτεινές, να μην είναι θολές, ο προσανατολισμός των ζευγών να είναι καλός και να υπάρχει μια επικάλυψη της τάξης 60%.

Στον Πίνακα 13 δίνονται μερικά παραδείγματα των κριτηρίων που πρέπει να πληρούνται.

Πίνακας 13: Κριτήρια για την επιλογή εικόνων κατάλληλων για φωτογραμμετρική επεξεργασία (Eisenbeiss, 2009)

Κριτήριο	Κατάλληλη εικόνα	Ακατάλληλη εικόνα
Ευκρίνεια		
Φωτεινότητα		

<p>Προσανατολισμός</p>		
<p>Επικάλυψη</p>		

4.4 Φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων από ΜΕΕΠ Πολλαπλών Στροφείων

4.4.1 Συλλογή δεδομένων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι μια μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα πολλαπλών στροφείων και μια ερασιτεχνική ψηφιακή μηχανή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το Octocopter, το οποίο είναι ελαφρύ σύστημα με 8 έλικες και έχει μέγιστο φορτίο ανύψωσης 1 kg. Η διάρκεια πτήσης του κυμαίνεται στα 15 λεπτά περίπου. Για την συλλογή των εικόνων, ενσωματώθηκε στο Octocopter, η ερασιτεχνική ψηφιακή μηχανή SAMSUNG NX1000.



Εικόνα 30: Το μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης Octocopter και η ψηφιακή μηχανή Samsung NX1000

Στον πίνακα που ακολουθεί, αναφέρονται τα βασικά της χαρακτηριστικά. Στοιχεία όπως το μέγεθος του pixel, η εστιακή απόσταση και το μέγεθος του αισθητήρα, είναι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον προγραμματισμό της πτήσης.

Πίνακας 14: Τα βασικά χαρακτηριστικά της ψηφιακής μηχανής SAMSUNG NX-1000

Ψηφιακή μηχανή	Samsung NX-1000
Μέγεθος εικόνας	5472*3648 pix
Μέγεθος pixel	4,3μm
Μέγεθος του αισθητήρα	23,5 x 15,7 mm
Μέγιστη ταχύτητα κλείστρου	1/1000 sec
Εστιακή απόσταση	16mm
Δυνατότητα αυτόματης εστίασης	NAI

Επειδή η εστιακή απόσταση του φακού είναι μικρότερη από την διαγώνιο του καρέ του φιλμ ($d=28,2\text{mm}$), ο φακός είναι ευρυγώνιος.

Οι παράμετροι προγραμματισμού της πτήσης που εκτέλεσε το Octocopter καθορίστηκαν με βάση τον διατιθέμενο εξοπλισμό και τις ανάγκες της αποτύπωσης.

Πίνακας 15: Παράμετροι προγραμματισμού πτήσης

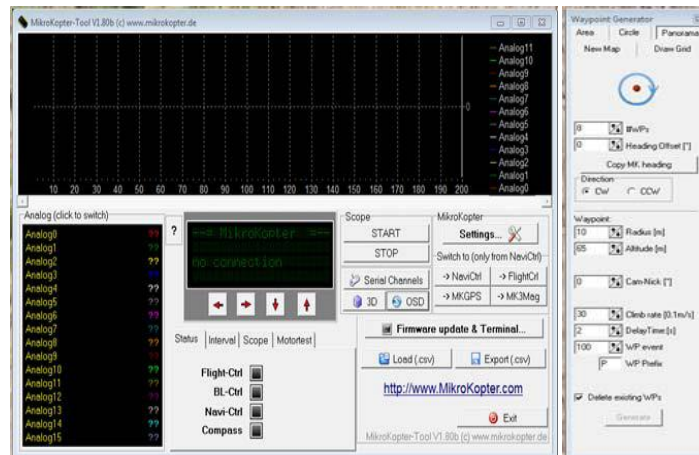
Ταχύτητα	3m/s
Συντεταγμένες σημείων πλοήγησης	Προσεγγιστικές από Google Earth
Αριθμός λωρίδων	4
Αριθμός σημείων πλοήγησης ανά λωρίδα	4
Κατεύθυνση	Νοτιοδυτική προς βορειοανατολική
Απόσταση μεταξύ των σημείων πλοήγησης	20m
Απόσταση μεταξύ των λωρίδων	45m
Ύψος πτήσης	35m
Κατά μήκος επικάλυψη	65-75%
Πλάγια επικάλυψη	35-45%

Στην Εικόνα 31 φαίνεται το σχέδιο πτήσης όπως ορίστηκε στο Google Earth.



Εικόνα 31: Σχέδιο πτήσης στο Google Earth

Η κλίμακα αεροφωτογράφισης δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$, οπότε για $c=16\text{mm}$ και ύψος πτήσης 35m προκύπτει $K=1/2.188$. Επομένως, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας είναι ίσο με $9,8\text{mm}=0,0098\text{m}$. Χρησιμοποιήθηκε επίσης, το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης MikroKopter.



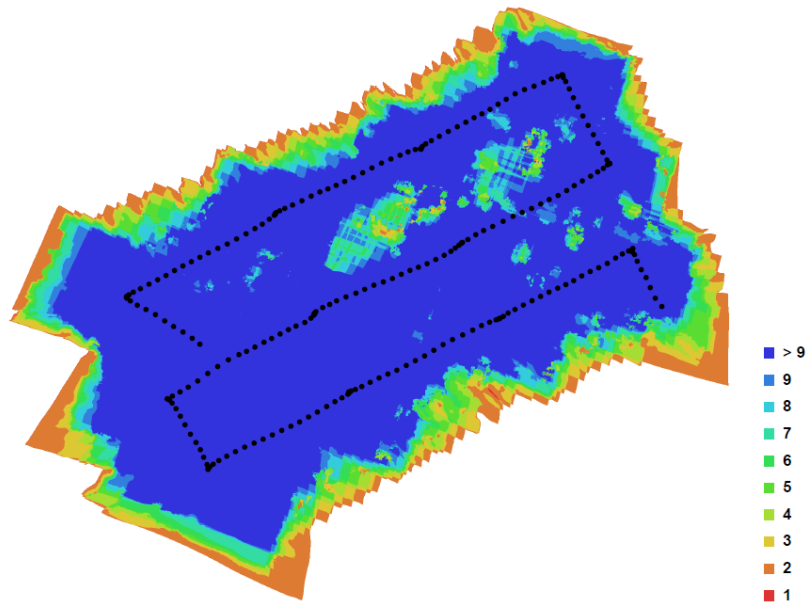
Εικόνα 32: Το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης MikroKopter

4.4.2 Φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων στο Photoscan

Η επεξεργασία των εικόνων στο Photoscan περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

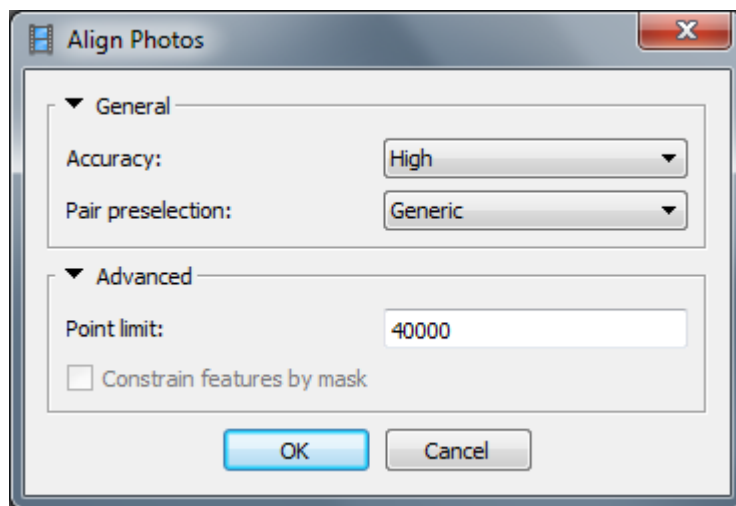
- εισαγωγή των εικόνων στο Photoscan
- προσεκτική εξέτασή τους και αφαίρεση όσων δεν είναι απαραίτητες
- ευθυγράμμιση των εικόνων
- παραγωγή πυκνού νέφους σημείων
- επεξεργασία του πυκνού νέφους σημείων
- παραγωγή πλέγματος (mesh)
- επεξεργασία πλέγματος (mesh)
- παραγωγή φωτοϋφής (texture)
- εξαγωγή αποτελεσμάτων

Αρχικά επιλέγονται οι εικόνες που θα χρησιμοποιηθούν και εισάγονται στο Photoscan. Από τις 390 εικόνες που συλλέχθηκαν, επιλέχθηκαν οι 237. Οι εικόνες αυτές προέρχονται από 3 λωρίδες πτήσης και απεικονίζουν τη βασική περιοχή ενδιαφέροντος. Οι επικαλύψεις τους είναι ιδιαίτερα μεγάλες, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τη γεωμετρία του μπλοκ.



Εικόνα 33: Οι θέσεις λήψης των εικόνων και οι επικαλύψεις τους

Μετά την εισαγωγή των εικόνων, ακολουθεί η διαδικασία αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων καθώς και ο σχετικός προσανατολισμός τους. Το στάδιο αυτό περιγράφεται στο πρόγραμμα με τον όρο *camera alignment*. Επιλέγεται η εντολή *Align Photos* από το μενού εργασιών.



Εικόνα 34: Παράμετροι ευθυγράμμισης των εικόνων στο Photoscan (*camera alignment*)

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι:

- Ακρίβεια: Διακρίνεται σε χαμηλή, μέτρια και υψηλή. Επιλέχτηκε η μεγαλύτερη ακρίβεια, με την οποία αποκτώνται πιο ακριβείς εκτιμήσεις για τις θέσεις λήψης των εικόνων. Απαιτείται όμως περισσότερος χρόνος επεξεργασίας σε σχέση με τις άλλες επιλογές.

- Προεπιλογή ζεύγους: Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή *Generic*, με την οποία καθορίζονται τα επικαλυπτόμενη ζεύγη των εικόνων χρησιμοποιώντας την χαμηλότερη ακρίβεια πρώτα. Σε περίπτωση που είναι γνωστές οι θέσεις λήψεων των εικόνων εισάγονται στο πρόγραμμα και επιλέγεται η επιλογή *Ground Control*.

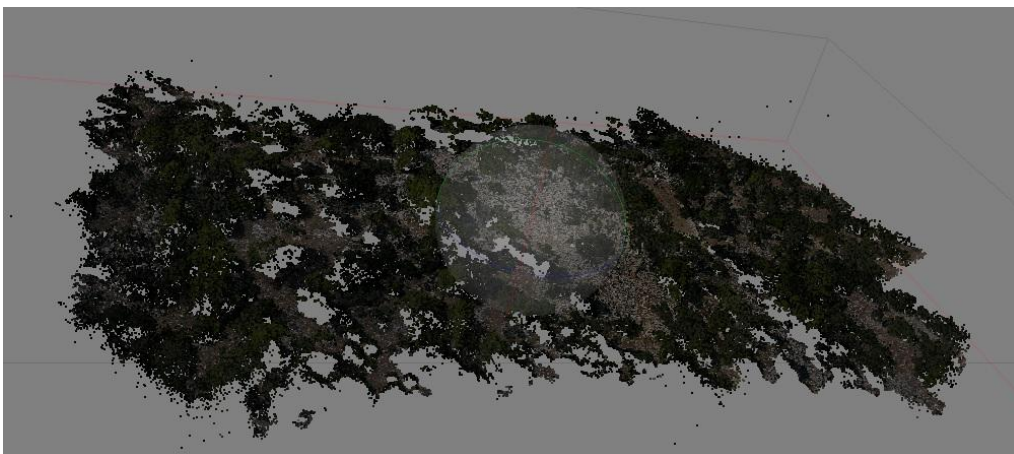
Επιπρόσθετες παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν είναι ο αριθμός των σημείων και η χρήση μάσκας. Η χρήση μάσκας συνιστάται σε περιπτώσεις όπου γύρω από το προς αποτύπωση αντικείμενο, υπάρχει ανεπιθύμητη πληροφορία και είναι προτιμότερο να μην ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία. Οι μάσκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κατά τις διαδικασίες παραγωγής του πυκνού νέφους σημείων, της φωτοϋφής και της ορθοφωτογραφίας. Για την συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης δεν ήταν απαραίτητη αυτή η λειτουργία.

Στο στάδιο αυτό το Photoscan ψάχνει και αντιστοιχίζει τα κοινά σημεία μεταξύ των εικόνων καθώς επίσης καθορίζει τη θέση λήψης κάθε εικόνας σε ένα αυθαίρετο τοπικό σύστημα αναφοράς. Επίσης, προσδιορίζει τις παραμέτρους του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων: την εστιακή απόσταση, τις συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου, τους συντελεστές της ακτινικής διαστρόφης dr (k_1, k_2, k_3 και k_4) και τους συντελεστές της εφαπτομενικής διαστρόφης (p_1 και p_2). Χρησιμοποιώντας τις τιμές που υπολόγισε, ολοκληρώνεται η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού των εικόνων.

Πίνακας 16: Στοιχεία βαθμονόμησης της ψηφιακής μηχανής Samsung NX-1000

Στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής υπολογισμένα από το Photoscan	
Μέγεθος του pixel (mm)	0.00438596
Εστιακή απόσταση (mm)	16
c_x -τετμημένη του πρωτεύοντος σημείου	2752.41
c_y -τεταγμένη του πρωτεύοντος σημείου	1815.01

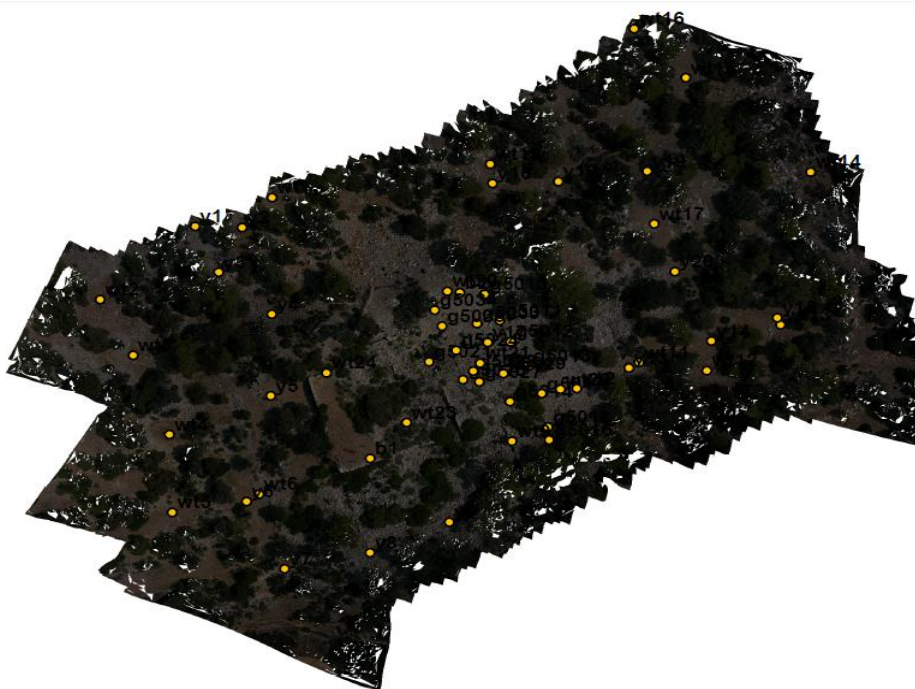
Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτή την επεξεργασία είναι ένα αραιό νέφος σημείων. Συγκεκριμένα το νέφος που σχηματίστηκε αποτελείται από 942.023 σημεία.



Εικόνα 35: Αραιό νέφος σημείων στο Photoscan

Ουσιαστικά με την ενέργεια αυτή επιτυγχάνεται ο σχετικός προσανατολισμός των εικόνων του μπλοκ και η δημιουργία του στερεοσκοπικού μοντέλου. Για τον απόλυτο προσανατολισμό του στερεομοντέλου, δηλαδή για τον προσδιορισμό της κατάλληλης κλίμακας και της θέσης του αντικειμένου στο χώρο, είναι απαραίτητη η χρήση επίγειων σημείων ελέγχου.

Συγκεκριμένα, εισάγεται στο πρόγραμμα το αρχείο με τις συντεταγμένες των επίγειων σημείων ελέγχου. Επιλέγεται το σύστημα αναφοράς στο οποίο έχουν μετρηθεί (ΕΓΣΑ 87). Στη συνέχεια, γίνεται η σκόπευση των αντίστοιχων σημείων σε όλες τις εικόνες στις οποίες είναι ορατά. Μετά την σκόπευση των 3 σημείων, το πρόγραμμα εμφανίζει προσεγγιστικά και την θέση των υπολοίπων. Τα επίγεια σημεία ελέγχου είναι ομοιόμορφα καταναμημένα στην περιοχή. Όταν ολοκληρωθούν οι σκοπεύσεις όλων των σημείων, επιλέγοντας την εντολή *Optimize*, γίνεται η βελτιστοποίηση της ευθυγράμμισης των εικόνων. Η αρχική εκτίμηση, πιθανόν, να περιέχει κάποια λάθη στις εκτιμήσεις, που εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η επικάλυψη των εικόνων ή το σχήμα του αντικειμένου. Κατά τη διάρκεια της γεωαναφοράς του μοντέλου χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός ομοιότητας. Ο μετασχηματισμός ομοιότητας αποτελείται από 7 παραμέτρους: 3 μετατοπίσεις (X_0, Y_0, Z_0), 3 στροφές (Ω, Φ, K) και 1 κλίμακα (m). Η ακρίβεια γεωαναφοράς βελτιώνεται σημαντικά μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία θα βασίζεται μόνο στα επίγεια σημεία ελέγχου. Η ακρίβεια υπολογισμού των συντεταγμένων των επίγειων σημείων ελέγχου είναι μεγαλύτερη της ακρίβειας των θέσεων λήψης των εικόνων που είναι μετρημένες με συστήματα δορυφορικού εντοπισμού (GPS). Ως εκ τούτου, ακόμα και εάν είναι γνώστες οι θέσεις λήψης των εικόνων, είναι προτιμότερο να μην ληφθούν υπόψη στη συγκεκριμένη διαδικασία.



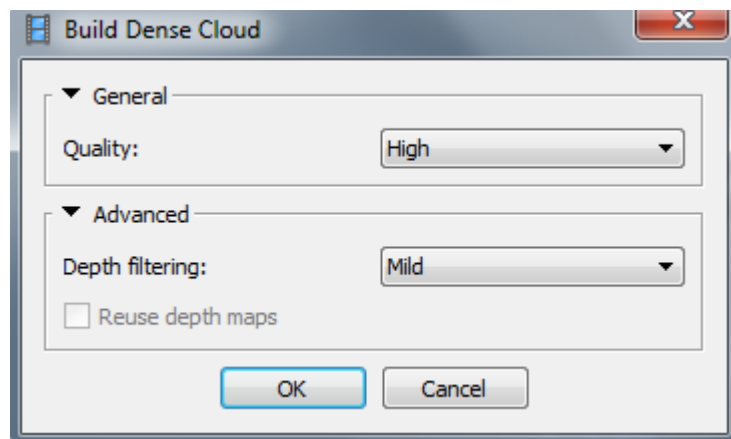
Εικόνα 36: Κατανομή επίγειων σημείων ελέγχου

Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ελευθερίας ενός δικτύου, τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα της συνόρθωσης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των μετρήσεων: $RMS_{PIXEL}=0,61\text{pixel}$ και $RMS=0,03\text{m}$.

Πίνακας 17: Συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης

Αεροτριγωνισμός	
Αριθμός εικόνων	237
Αριθμός σημείων σύνδεσης	942.023
Σύνολο προβολών σημείων σύνδεσης	3.787.581
Αριθμός επίγειων σημείων ελέγχου	52
Σύνολο προβολών σημείων ελέγχου	647
Σύνολο παρατηρήσεων n (σημείων σύνδεσης και επίγειων σημείων ελέγχου)	7.576.456
Σύνολο αγνώστων m	1427
Βαθμός ελευθερίας r	7.575.029

Στη συνέχεια, ακολουθεί η παραγωγή του πυκνού νέφους σημείων. Βασιζόμενο στις θέσεις λήψης των εικόνων το πρόγραμμα υπολογίζει πληροφορίες βάθους για κάθε εικόνα. Έχει, επίσης, την τάση να δημιουργεί πολύ πυκνά νέφη σημείων, ενδεχομένως της ίδιας πυκνότητας με τα συστήματα LiDAR. Το νέφος σημείων μπορεί να υποστεί επεξεργασία στο Photoscan ή και σε άλλα προγράμματα. Επιλέγεται η εντολή *Build Dense Cloud* από το μενού εργασιών.



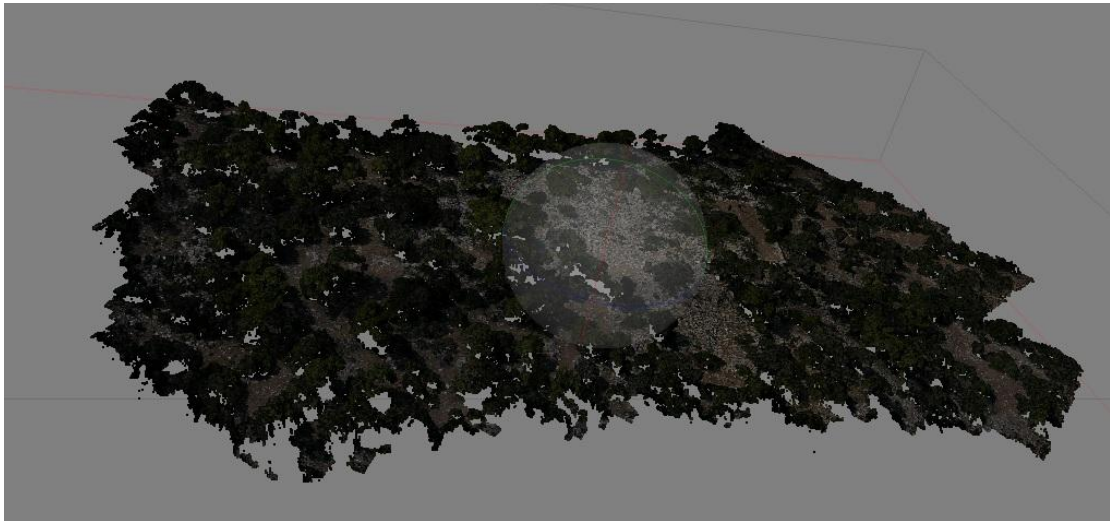
Εικόνα 37: Παράμετροι για την παραγωγή του πυκνού νέφους σημείων στο Photoscan

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι:

- Ποιότητα: Καθορίζει την επιθυμητή ποιότητα ανακατασκευής. Κυμαίνεται από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή (lowest-ultra high). Επιλέχθηκε η υψηλή, για την απόκτηση λεπτομερούς και ακριβούς γεωμετρίας, αλλά απαιτήθηκε περισσότερος χρόνος επεξεργασίας.
- Μέθοδος φιλτραρίσματος για την δημιουργία χαρτών βάθους (depth filtering): Στο στάδιο αυτό, παράγονται χάρτες βάθους για κάθε εικόνα (depth maps).

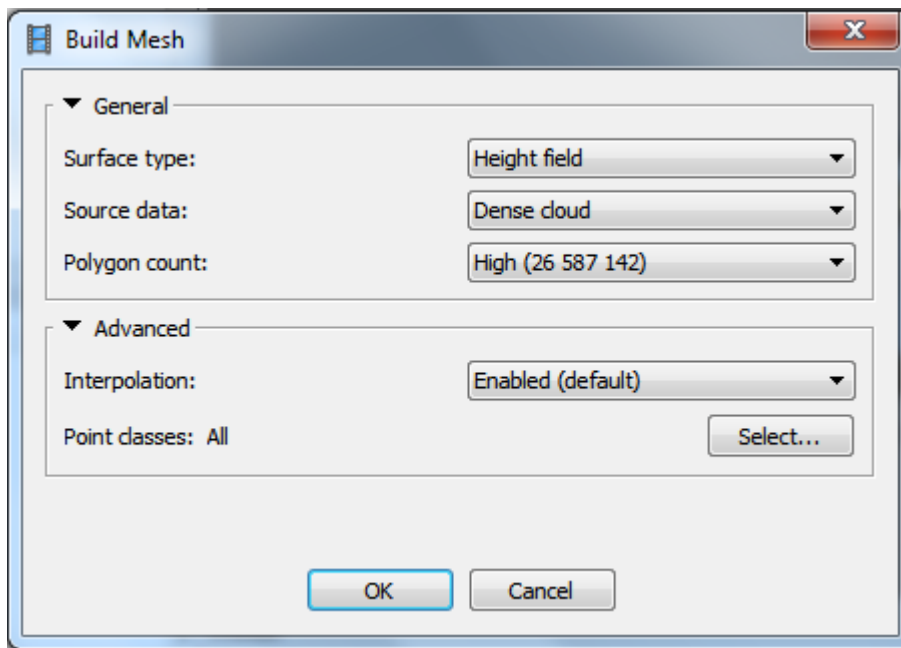
Εικόνες που περιέχουν αρκετό θόρυβο ή έχουν κακή εστίαση μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ακραίων τιμών μεταξύ των σημείων. Το πρόγραμμα διαθέτει ενσωματωμένους αλγορίθμους ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε έργου. Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή *Mild* επειδή η περιοχή μελέτης είναι πολύπλοκη και διαθέτει πλήθος από μικρές λεπτομέρειες που πρέπει να αποτυπωθούν. Σε αντίθετη περίπτωση, επιλέγεται η μέθοδος *Aggressive*, ενώ για ενδιάμεσες προσεγγίσεις η μέθοδος *Moderate*.

Το πυκνό νέφος που σχηματίστηκε περιέχει 132.935.713 σημεία.



Εικόνα 38: Πυκνό νέφος σημείων στο Photoscan

Η διαδικασία που ακολουθεί είναι η παραγωγή πλέγματος. Βασιζόμενο στο πυκνό νέφος σημείων που δημιουργήθηκε προηγουμένως, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο πολυγωνικό πλέγμα που αναπαριστά την επιφάνεια του αντικειμένου. Επιλέγεται η εντολή *Build Mesh* από το μενού εργασιών.

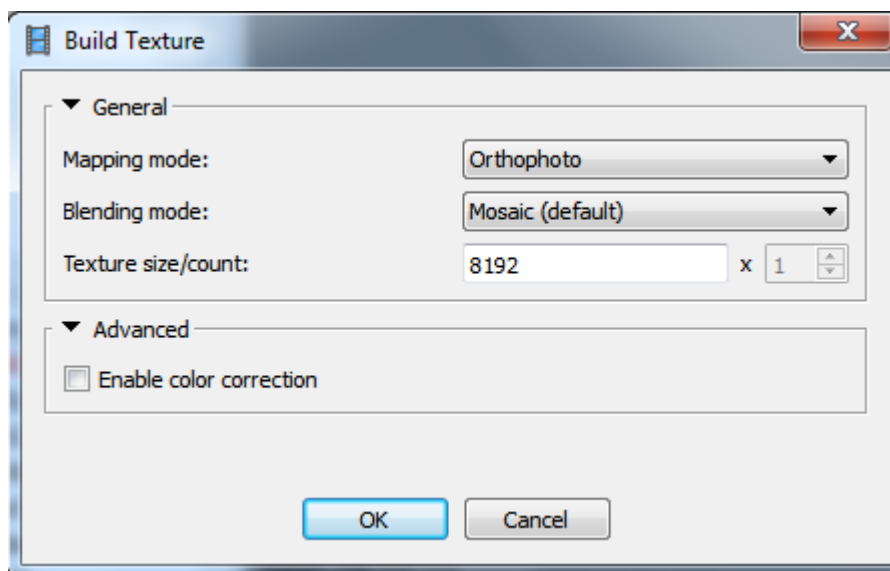


Εικόνα 39: Παράμετροι για την παραγωγή του πλέγματος (mesh) στο Photoscan

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι:

- Επιλογή τύπου επιφάνειας: Η αλγοριθμική μέθοδος *Height field* ενδείκνυται για αεροφωτογραφίες και την μοντελοποίηση σχεδόν επίπεδων επιφανειών. ενώ η *Arbitrary* για κάθε τύπο αντικειμένου. Επειδή η περιοχή μελέτης έχει μέτριο ανάγλυφο και οι εικόνες προέρχονται από αεροφωτογράφιση χρησιμοποιήθηκε η πρώτη μέθοδος.
- Πηγή δεδομένων: Επιλέγεται το πυκνό ή το αραιό νέφος σημείων. Επιλέχτηκε το πυκνό νέφος σημείων χρησιμοποιείται για καλύτερο ποιοτικά αποτέλεσμα.
- Καθορισμός αριθμού πολυγώνων
- Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της μεθόδου παρεμβολής: Με την ενεργοποίηση της το πρόγραμμα θα παρεμβάλλει μερικές περιοχές μεταξύ ενός κύκλου με συγκεκριμένη ακτίνα, γύρω από κάθε σημείο του νέφους. Συνεπώς, μερικά κενά που τυχόν να υπάρχουν να καλύπτονται αυτόματα. Ωστόσο, αν εξακολουθούν να υπάρχουν κάποια κενά καλύπτονται σε μεταγενέστερο βήμα.

Το τελευταίο στάδιο είναι η παραγωγή της φωτοϋφής του μοντέλου (texture). Επιλέγεται η εντολή *Build Texture* από το μενού εργασιών.

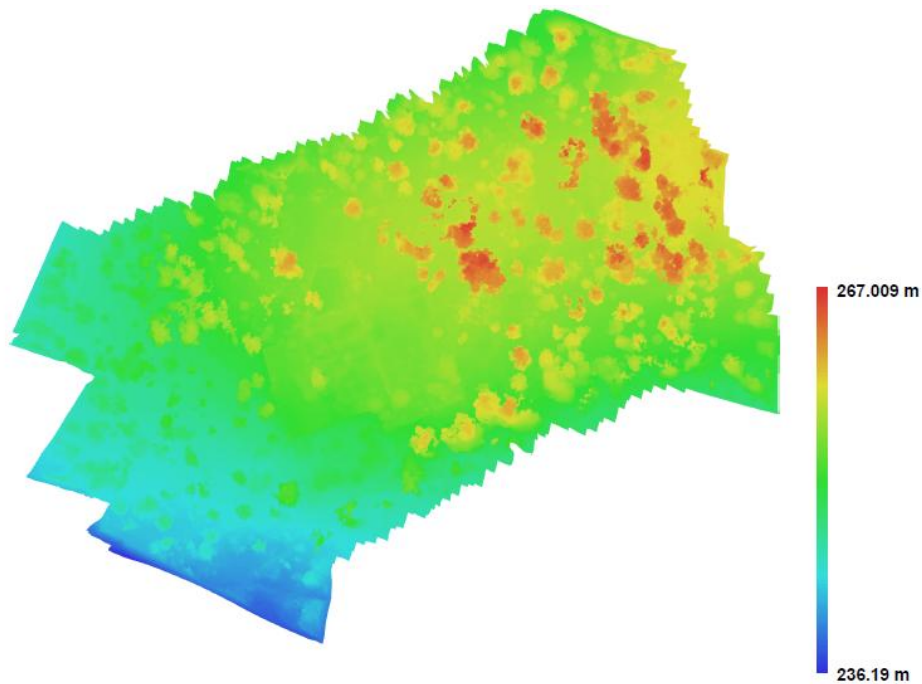


Εικόνα 40: Παράμετροι για την απόδοση φωτοϋφής στο μοντέλο

Οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι η μέθοδος χαρτογράφησης, η μέθοδος συνδυασμού των εικόνων, το μέγεθος της σε pixel και η ενεργοποίηση της διόρθωσης χρώματος. Οι επιλογές που επιλέχθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 40.

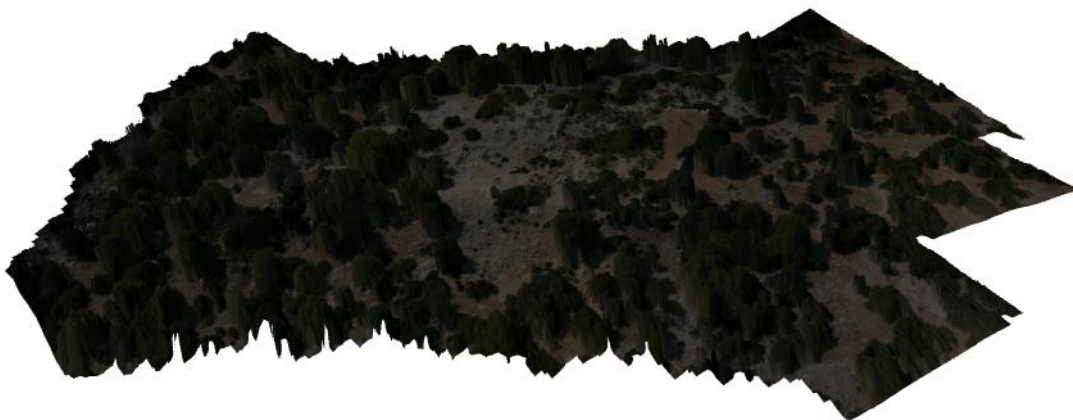
Με την ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων είναι δυνατή η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας έχει εύρος τιμών υψομέτρων από τα 236,19 μέτρα έως τα 267,009 μέτρα. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας του είναι 0,0167081 μέτρα και απεικονίζονται κατά μέσο όρο 3.582,15 σημεία ανά τετραγωνικό.



Εικόνα 41: Ψηφιακό Μοντέλο Επιφάνειας

Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο της περιοχής απεικονίζεται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42: Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο

Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας επιλέχθηκε το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας. Συγκεκριμένα, ορίστηκε $GSD=0.02m$ και επομένως η κλίμακα απόδοσης είναι 1:200.



Εικόνα 43: Ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:200

4.5 Φωτογραμμετρική επεξεργασία εικόνων από ΜΕΕΠ Σταθερών Πτερυγίων

4.5.1 Συλλογή δεδομένων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι μια μη επανδρωμένη εναέρια πλατφόρμα σταθερών πτερυγίων και μια ερασιτεχνική ψηφιακή μηχανή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Swinglet Cam της εταιρείας Sensefly. Οι τεχνικές προδιαγραφές του παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 18: Τεχνικές προδιαγραφές του Swinglet Cam

Βάρος (μαζί με την ψηφιακή μηχανή)	Περίπου 0.5kg
Άνοιγμα φτερών	80cm
Προώθηση	Ηλεκτρική
Μέγιστη διάρκεια πτήσης	30min
Ταχύτητα πλοήγησης	36km/h
Αντοχή στον άνεμο	Έως 25km/h
Αυτόματος προγραμματισμός πτήσης	ΝΑΙ
Μέγεθος εδαφοψηφίδας	Κάτω από 1.5cm ανά pixel

Η ψηφιακή μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των εικόνων είναι η Canon IXUS 220HS.



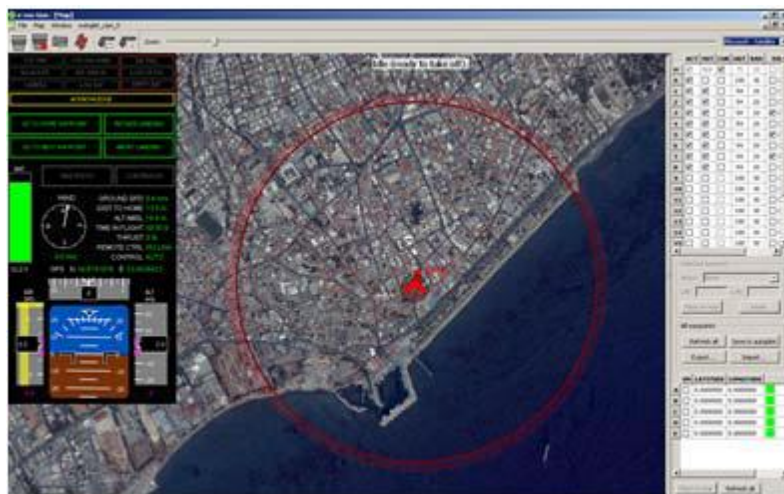
Εικόνα 44: Το μη επανδρωμένο σύστημα αεροφωτογράφισης Swinglet Cam και η ψηφιακή μηχανή Canon IXUS 220HS

Τα στοιχεία της ψηφιακής μηχανής δίνονται στον πίνακα. Επειδή η εστιακή απόσταση του φακού είναι μικρότερη από την διαγώνιο του καρέ του φιλμ ($d=7,66\text{mm}$), ο φακός που χρησιμοποιήθηκε είναι ευρυγώνιος.

Πίνακας 19: Βασικά χαρακτηριστικά της ψηφιακής μηχανής Canon IXUS 220HS

Ψηφιακή μηχανή	Canon IXUS 220HS
Μέγεθος εικόνας	4000*3000 pix
Μέγεθος pixel	1,5 μm
Μέγεθος του αισθητήρα	6,17*4,55mm
Μέγιστη ταχύτητα κλείστρου	1/2000 sec
Εστιακή απόσταση	4,3mm
Δυνατότητα αυτόματης εστίασης	NAI

Για τον προγραμματισμό της πτήσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα e-motion.



Εικόνα 45: Το λογισμικό προγραμματισμού πτήσης e-motion

Πρώτη πτήση: Η κλίμακα αεροφωτογράφισης δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$, οπότε για $c=4,3\text{mm}$ και ύψος πτήσης 60m είναι $K=1/13.954$. Επομένως, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας είναι ίσο με $20,9\text{mm}=0,021\text{m}$.

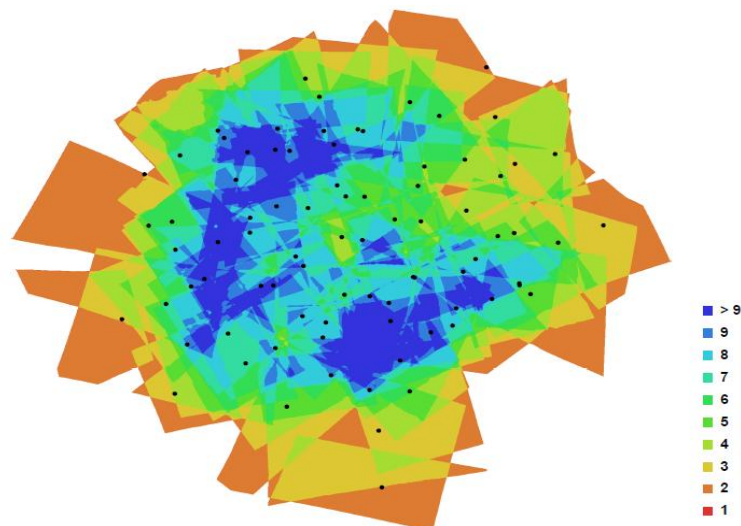
Δεύτερη πτήση: Η κλίμακα αεροφωτογράφισης δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$, οπότε για $c=4,3\text{mm}$ και ύψος πτήσης 90m είναι $K= 1/20.930$. Επομένως, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας είναι ίσο με $31,4\text{mm}=0,031\text{m}$.



Εικόνα 46: Σχέδια πτήσης στο Google Earth (πρώτη πτήση αριστερά, δεύτερη πτήση δεξιά)

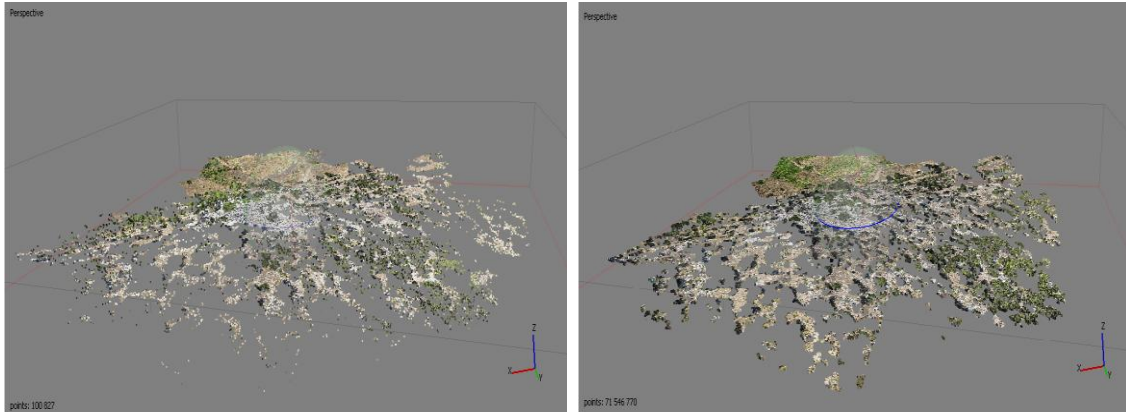
4.5.2 Φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων στο Photoscan

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των εικόνων κάθε πτήσης ξεχωριστά. Ωστόσο, επειδή τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά, αποφασίστηκε ο συνδυασμός των δεδομένων και των δύο πτήσεων. Επιλέχθηκαν 83 εικόνες συνολικά και από τις 2 πτήσεις. Οι θέσεις λήψης των εικόνων και οι επικαλύψεις τους φαίνονται στην εικόνα. Η διαδικασία επεξεργασίας στο Photoscan, είναι ακριβώς ίδια για όλα τα έργα που πραγματοποιήθηκαν. Επομένως, για λόγους συντομίας και επειδή αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, παρατίθενται μόνο τα αποτελέσματα.



Εικόνα 47: Θέσεις λήψης των εικόνων και επικαλύψεις

Το αραιό νέφος σημείων, που σχηματίστηκε μετά την ευθυγράμμιση των εικόνων, αποτελείται από 100.827 σημεία. Το πυκνό νέφος σημείων που σχηματίστηκε αποτελείται από 71.546.770 σημεία. Για την δημιουργία του επιλέχθηκε η Ultra High ποιότητα.



Εικόνα 48: Αραιό (αριστερά) και πυκνό (δεξιά) νέφος σημείων στο Photoscan

Τα στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής δίνονται στον πίνακα.

Πίνακας 20: Στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής Canon IXUS 220HS

Στοιχεία βαθμονόμησης της μηχανής υπολογισμένα από το Photoscan	
Μέγεθος του pixel (mm)	0.0015494
Εστιακή απόσταση (mm)	4.3
c_x -τετμημένη του πρωτεύοντος σημείου	2010.61
c_y -τεταγμένη του πρωτεύοντος σημείου	1518.15

Η διαδικασία του αεροτριγωνισμού ολοκληρώνεται μετά την σκόπευση των επίγειων σημείων ελέγχου. Η κατανομή τους φαίνεται στην εικόνα.



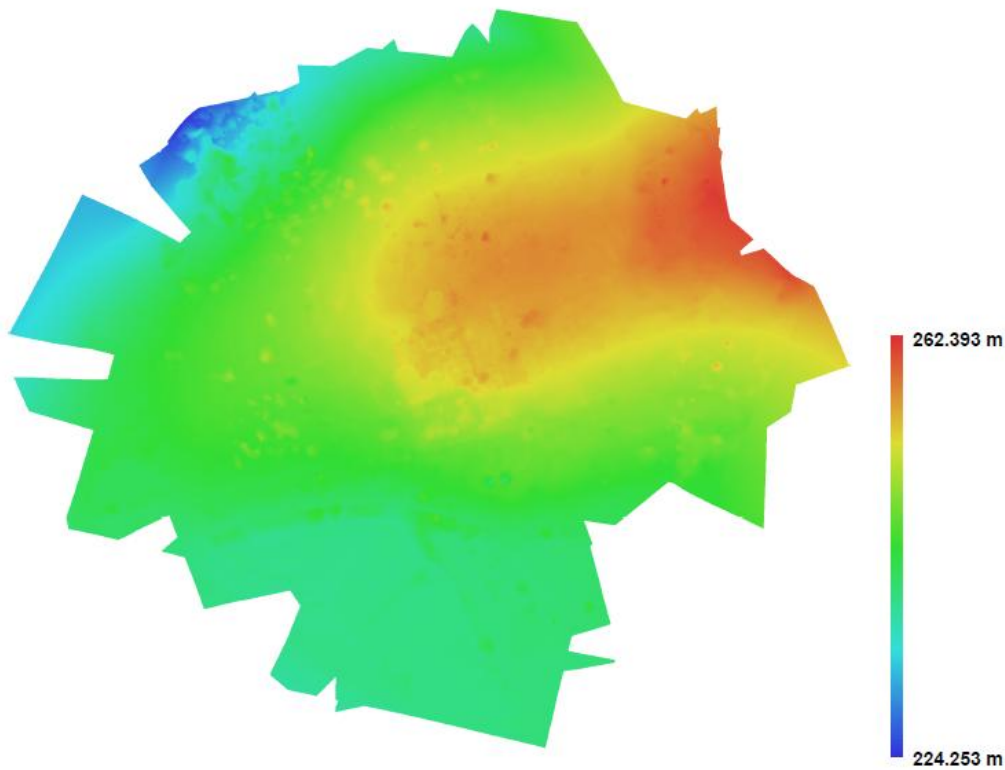
Εικόνα 49: Κατανομή επίγειων σημείων ελέγχου

Τα σημεία σύνδεσης εντοπίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα κατά το στάδιο ευθυγράμμισης των εικόνων. Ο βαθμός ελευθερίας της συνόρθωσης του μπλοκ των εικόνων είναι πολύ μικρότερος από αυτόν του προηγούμενου έργου. Υπολογίστηκε επίσης το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των μετρήσεων: $RMS_{PIXEL}=0,59pixel$ και $RMS=0,04m$.

Πίνακας 21: Συνόρθωση με τη μέθοδο της δέσμης

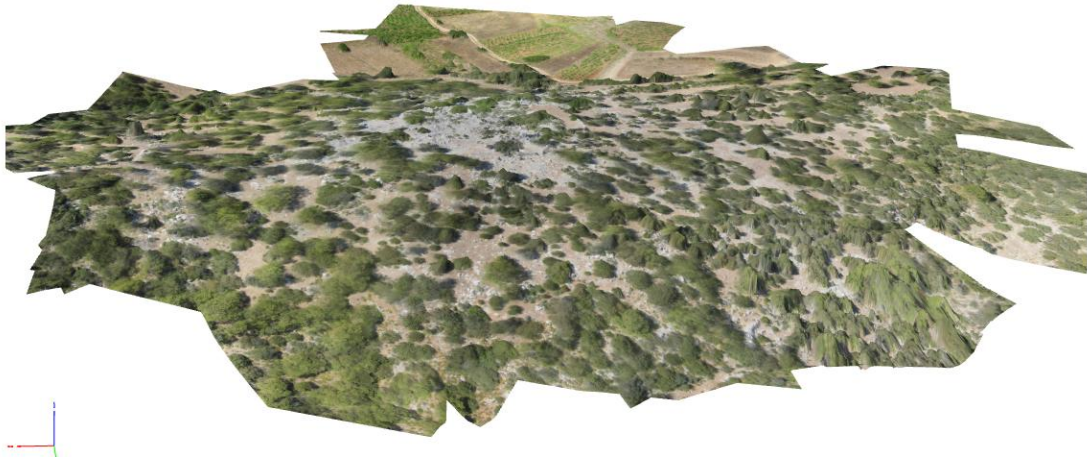
Αεροτριγωνισμός	
Αριθμός εικόνων	83
Αριθμός σημείων σύνδεσης	100.827
Σύνολο προβολών σημείων σύνδεσης	230.955
Αριθμός επίγειων σημείων ελέγχου	49
Σύνολο προβολών σημείων ελέγχου	304
Σύνολο παρατηρήσεων n (σημείων σύνδεσης και επίγειων σημείων ελέγχου)	462.518
Σύνολο αγνώστων m	503
Βαθμός ελευθερίας r	462.015

Το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας έχει εύρος τιμών υψομέτρων από τα 224,253 μέτρα έως τα 262,393 μέτρα. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας του είναι 0,0210423 μέτρα και απεικονίζονται κατά μέσο όρο 2.258,46 σημεία ανά τετραγωνικό.



Εικόνα 50: Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας

Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο της περιοχής απεικονίζεται στην Εικόνα 51.



Εικόνα 51: Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο

Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας επιλέχθηκε το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ 87) και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας. Συγκεκριμένα, ορίστηκε $GSD=0.04m$ και επομένως η κλίμακα απόδοσης είναι 1:400.



Εικόνα 52: Ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:400

4.6 Αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων

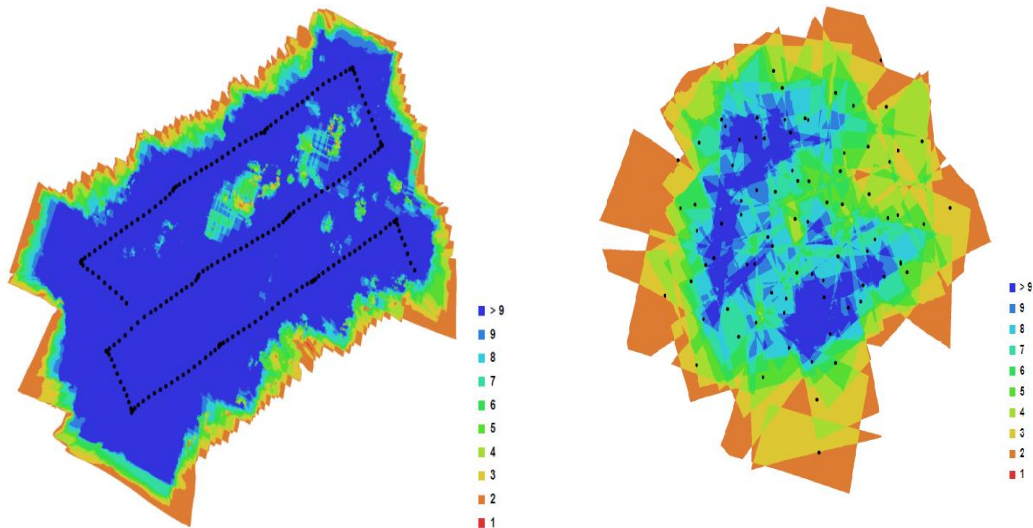
Στις προηγούμενες ενότητες περιγράφηκε η συλλογή και η φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων που συλλέχθηκαν με δύο διαφορετικά μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης, το Octocopter και το Swinglet Cam. Καθένα από τα συστήματα αυτά, ανήκει σε διαφορετική κατηγορία και ως εκ τούτου έχει κάποιες ιδιαιτερότητες, που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

4.6.1 Αξιολόγηση των δεδομένων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε

Το Octocopter ανήκει στην κατηγορία συστημάτων πολλαπλών στροφειών και ενδείκνυται σε αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας, επειδή πετάει σε χαμηλότερα ύψη πτήσης. Αντίθετα, το Swinglet Cam, που είναι σύστημα σταθερών πτερυγίων, πετάει σε μεγαλύτερα ύψη πτήσης και ως εκ τούτου, έχει μεγαλύτερο εύρος κάλυψης περιοχής και προτιμάται σε αποτυπώσεις μεγάλων εκτάσεων.

Τα συστήματα αυτά είναι ελαφριά, έχουν παρόμοιο μέγεθος και φορτίο και μεταφέρονται εξίσου εύκολα. Επίσης, έχουν και τα δύο τη δυνατότητα προγραμματισμού της πτήσης που θα εκτελέσουν μέσω ειδικών προγραμμάτων προσομοίωσης πτήσης. Ως εκ τούτου, τηρούνται (εκτός απροόπτου) οι παράμετροι που ορίστηκαν κατά τον προγραμματισμό πτήσης και οι εικόνες που συλλέγονται είναι ιδανικές για φωτογραμμετρική επεξεργασία.

Οι βασικές διαφορές των συστημάτων αυτών είναι η ταχύτητά τους και η διάρκεια της πτήσης. Η ταχύτητα του Octocopter είναι 3m/s, ενώ του Swinglet Cam 10m/s. Η αυξημένη ταχύτητα αλλά και οι κραδασμοί της μηχανής επηρέασαν την ποιότητα των εικόνων που πάρθηκαν με το Swinglet Cam. Ειδικότερα, στην πρώτη πτήση που πετούσε στα 60m, οι εικόνες δεν ήταν καλά εστιασμένες και ευκρινείς. Το σύστημα αυτό ανταποκρίνεται καλύτερα σε μεγαλύτερα ύψη πτήσης. Αντίθετα, το Octocopter είχε μεγαλύτερη αντοχή στον άνεμο και είναι πιο σταθερό σύστημα. Ως εκ τούτου, οι εικόνες ήταν πολύ καλά εστιασμένες. Η διάρκεια της πτήσης του Octocopter ήταν 15min και πάρθηκαν 391 εικόνες, ενώ η μέγιστη διάρκεια πτήσης του Swinglet Cam είναι 30min. Στην πρώτη πτήση που εκτέλεσε σε ύψος 60μ συλλέχθηκαν 98 εικόνες, ενώ στην δεύτερη πτήση όπου το ύψος κυμαινόταν από 60 έως 90μ, συλλέχθηκαν 96 εικόνες. Κατά τη φωτογραμμετρική επεξεργασία επιλέχτηκε ένα μέρος από αυτές εστιάζοντας στο κύριο μέρος της ανασκαφής. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, οι επικαλύψεις των εικόνων που συλλέχθηκαν με το Octocopter είναι πολύ μεγαλύτερες από τις εικόνες που συλλέχθηκαν με το άλλο σύστημα.



Εικόνα 53: Επικαλύψεις και θέσεις λήψης των εικόνων

Οι φακοί που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις είναι ευρυγώνιοι. Η χρήση του ευρυγώνιου φακού ενδείκνυται για τοπία και κοντινά θέματα. Παρ' όλο που παρουσιάζουν αυξημένες γεωμετρικές παραμορφώσεις, χρησιμοποιούνται σε μετρητικές εφαρμογές όταν προέχει η μεγαλύτερη κάλυψη του αντικειμένου ή όταν οι συνθήκες λήψης το απαιτούν. Επίσης, όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση του φακού, τόσο μεγαλώνει το βάθος πεδίου.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πολλές εικόνες δεν ήταν καλά εστιασμένες (νετ) και δεν διαγράφονταν μικρές λεπτομέρειες. Ο παράγοντας που αναφέρεται στην έκταση της ζώνης εστίασης της εικόνας ονομάζεται βάθος πεδίου. Το βάθος πεδίου, εκτός από την εστιακή απόσταση, εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η απόσταση του θέματος και της μηχανής και η τιμή του διαφράγματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση του φακού από το θέμα, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το βάθος πεδίου. Η απόσταση της μηχανής στην περίπτωση του Octocopter είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του Swingle Cam. Όμως, οι εικόνες που συλλέχθηκαν με το Octocopter ήταν πολύ καλύτερα εστιασμένες από αυτές που συλλέχθηκαν με το Swingle Cam. Αυτό οφείλεται στην τιμή του διαφράγματος, του φακού, η οποία στην περίπτωση της ψηφιακής μηχανής Samsung NX 1000, ήταν $f/13$. Η τιμή του διαφράγματος του φακού της ψηφιακής μηχανής Canon IXUS 220HS, κυμαινόταν από την τιμή $f/2.8$ έως $f/8$. Όσο το διάφραγμα κλείνει, τόσο το βάθος πεδίου μεγαλώνει. Ωστόσο, όσο μεγαλώνει η τιμή του διαφράγματος, τόσο μειώνεται η ποσότητα φωτός που περνά από τον φακό. Για να αντισταθμιστεί αυτή η επιλογή, η τιμή της ευαισθησίας ISO ήταν ίση με 200, ενώ στην άλλη περίπτωση η τιμή της κυμαινόταν από 100 έως 160. Παρ' όλα αυτά, οι εικόνες που πάρθηκαν με την ψηφιακή μηχανή Samsung NX 1000 ήταν λίγο σκοτεινές, αλλά με πολύ καλή εστίαση και ευκρίνεια.

Το μέγεθος του pixel της αρχικής εικόνας, είναι καθοριστικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον προγραμματισμό της πτήσης, αφού συνδέεται και με

άλλους παράγοντες, όπως η κλίμακα, το ύψος πτήσης και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας.

Πίνακας 22: Σύγκριση των δύο περιπτώσεων μελέτης

ΜΕΕΠ	Octocopter	Swinglet Cam
Ύψος πτήσης	35m	60m και 90m
Εστιακή απόσταση	16mm	4,3mm
Κλίμακα αεροφωτογράφισης	1/2.188	1/13.954 και 1/20.930
Μέγεθος pixel	4,3μm	1,5μm
GSD αρχικής εικόνας	0,0098m	0,021m και 0,031m

Το GSD της ορθοφωτογραφίας δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το GSD της αρχικής εικόνας. Η σχέση που συνδέει το GSD της ορθοφωτογραφίας με την κλίμακα απόδοσης είναι: $GSD = 0,1mm * \text{κλίμακα απόδοσης}$. Κάνοντας τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτουν τα εξής:

- Η μέγιστη κλίμακα απόδοσης για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το σύστημα Octocopter είναι 1/100.
- Η μέγιστη κλίμακα απόδοσης για τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με το σύστημα Swinglet Cam (λαμβάνοντας υπόψη και τις 2 πτήσεις) είναι περίπου 1/300.

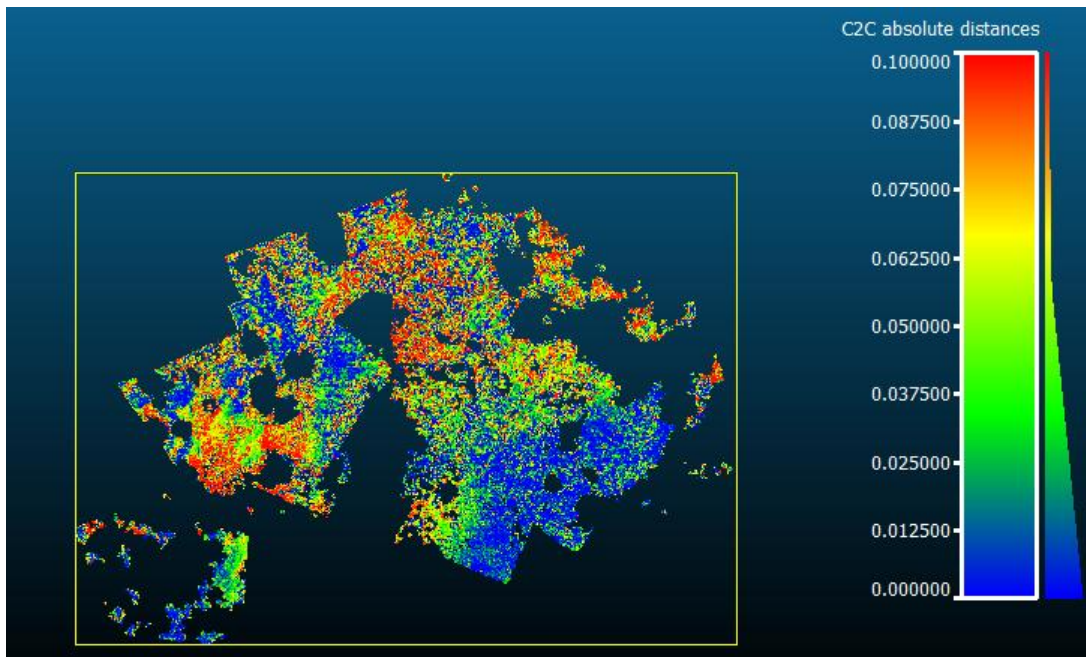
Το ύψος πτήσης, εκτός από την κλίμακα απόδοσης, επηρεάζει το μέγεθος των προοπτικών παραμορφώσεων. Όσο μεγαλώνει το ύψος πτήσης, τόσο μικραίνουν οι προοπτικές παραμορφώσεις.

4.6.2 Δυνατότητες επεξεργασίας

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν και από τα δύο συστήματα προσφέρονται για φωτογραμμετρική αξιοποίηση. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του συστήματος σταθερών πτερυγίων Swinglet Cam, κρίθηκε σκόπιμος ο συνδυασμός των δεδομένων από 2 διαφορετικές πτήσεις προκειμένου να βελτιωθεί το αποτέλεσμα και να ενισχυθεί η γεωμετρία του μπλοκ. Και στις δύο περιπτώσεις, με την κατάλληλη επεξεργασία στο Photoscan, δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα της περιοχής, ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας, πυκνά νέφη σημείων και ορθοφωτογραφίες.

4.6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σε πρώτη φάση, συγκρίθηκαν τα πυκνά νέφη σημείων που προέκυψαν από την επεξεργασία στο Photoscan. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Cloud Compare. Ως νέφος αναφοράς, επιλέχθηκε το νέφος σημείων από τις εικόνες που πάρθηκαν με το Octocopter. Για την διευκόλυνση της σύγκρισης των δύο νεφών, περιορίστηκε η περιοχή στα βασικά μέρη της ανασκαφής.



Εικόνα 54: Σύγκριση νεφών σημείων στο Cloud Compare

Το νέφος αναφοράς αποτελείται από 12.273.481 σημεία, ενώ το άλλο νέφος από 5.722.463 σημεία. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το δεύτερο νέφος έχει πολλά κενά, ιδίως σε περιοχές όπου υπάρχει βλάστηση. Στο υπόλοιπο κομμάτι, οι διαφορές κυμαίνονται έως 10 εκατοστά. Η μέση απόσταση των δύο νεφών υπολογίστηκε από το πρόγραμμα 1,89 μέτρα και η τυπική απόκλιση 4,377542 μέτρα.

Συγκρίνοντας τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας (εικόνα και εικόνα), εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας του ΨΜΕ που προέκυψε από τις εικόνες που πάρθηκαν με το Octocopter είναι μικρότερο από αυτό του ΨΜΕ που προέκυψε από τις εικόνες που πάρθηκαν με το Swinglet Cam. Συνεπώς, η κλίμακα του πρώτου είναι λίγο μεγαλύτερη από την κλίμακα του δεύτερου. Δηλαδή:
 $GSD_{OCTOCOPTER} = 0,0167081m$ έναντι $GSD_{SWINGLET_CAM} = 0,0210423m$ και
 $Κλίμακα_{OCTOCOPTER} = 1/167$ έναντι $Κλίμακα_{SWINGLET_CAM} = 1/210$.
- Η πυκνότητα των σημείων του πρώτου ΨΜΕ είναι ίση με 3.582,15 σημεία/τ.μ., ενώ του δεύτερου είναι ίση με 2.258,46 σημεία/τ.μ. Η υπεροχή του πρώτου, έναντι του δεύτερου φάνηκε και στο νέφος σημείων, γι' αυτό και επιλέχθηκε ως νέφος αναφοράς.
- Παρατηρώντας προσεκτικά, τα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας που δημιουργήθηκαν, διαπιστώνονται κάποιες διαφορές μεταξύ τους. Στο πρώτο ΨΜΕ, παρατηρούνται διαφορές στα υψόμετρα, ειδικά σε περιοχές όπου υπάρχει βλάστηση. Στο δεύτερο όμως, υπάρχει αρκετή ομοιογένεια στην αντίστοιχη περιοχή.

Από τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα, πως το πρώτο ΨΜΕ αντιπροσωπεύει καλύτερα την επιφάνεια του εδάφους από το δεύτερο.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα του δημιουργήθηκαν. Η τρισδιάστατη αναπαράσταση της περιοχής μελέτης, αποτέλεσε απαιτητικό έργο, κυρίως λόγω της έντονης βλάστησης αλλά και των πολύπλοκων ερειπίων. Όπως είναι αναμενόμενο, το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο που δημιουργήθηκε στην πρώτη περίπτωση, είναι καλύτερο, αφού το νέφος σημείων καθώς και το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας είχαν δώσει καλύτερα αποτελέσματα. Το βασικό πρόβλημα που εντοπίστηκε, είναι ότι το δεύτερο ψηφιακό μοντέλο δεν απέδωσε καθόλου καλά την βλάστηση, σε αντίθεση με το πρώτο που αποτύπωσε και το ύψος των δέντρων. Το μειονέκτημα όμως, του πρώτου, είναι ότι είναι αρκετά σκοτεινό, γεγονός που οφείλεται στις αρχικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν.

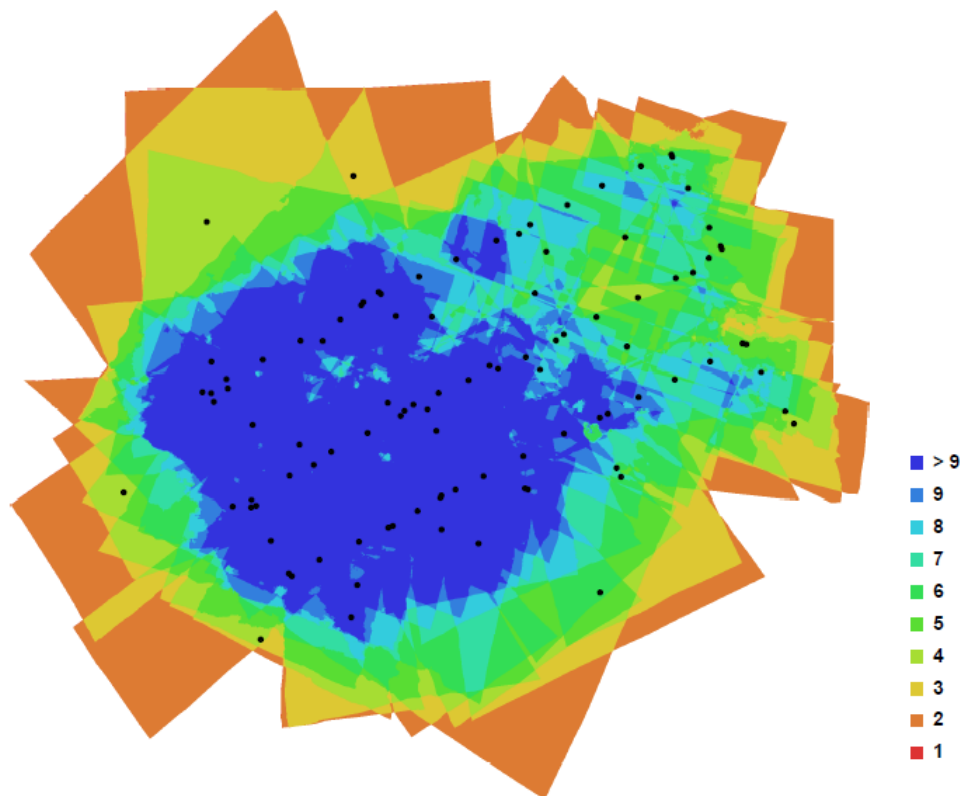
Τα σφάλματα στις ορθοφωτογραφίες διακρίνονται σε γεωμετρικά και ραδιομετρικά. Η οριζοντιογραφική ακρίβεια της ορθοφωτογραφίας σχετίζεται άμεσα με την κλίμακα, το μέγεθος του pixel των αρχικών εικόνων, την ακρίβεια των φωτοσταθερών, την ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας, καθώς και την ακρίβεια προσδιορισμού των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού των εικόνων. Τα βασικά σημεία διαφοροποίησης έγκεινται στην κλίμακα απόδοσης και στην ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η κλίμακα απόδοσης στο πρώτο έργο είναι η δύο φορές μεγαλύτερη από του δεύτερου. Επίσης, το πρώτο ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας είναι σε μεγαλύτερη κλίμακα και απεικονίζονται καλά περιοχές, όπως η βλάστηση. Ως εκ τούτου, στην πρώτη ορθοφωτογραφία προσδιορίζονται καλύτερα κάποιες λεπτομέρειες, όπου στην δεύτερη δεν είναι τόσο ευδιάκριτες και δεν παρατηρούνται μεγάλες προοπτικές παραμορφώσεις. Για να διευκολυνθεί η σύγκριση των ορθοφωτογραφιών, εξετάστηκε κάθε μέρος της ανασκαφής ξεχωριστά και είναι διαθέσιμη στο Παράρτημα.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η πρώτη ορθοφωτογραφία είναι καλύτερη ποιοτικά, αφού το σύστημα αεροφωτογράφισης που χρησιμοποιήθηκε ενδείκνυται για αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας. Επίσης, βοήθησε το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκε πυκνή αεροφωτογράφιση και οι εικόνες είχαν μεγάλες επικαλύψεις μεταξύ τους. Ωστόσο, εντοπίστηκαν μερικά ραδιομετρικά σφάλματα, στις σκιές των δέντρων.

Η δεύτερη ορθοφωτογραφία απεικονίζει αρκετά καλά τις βασικές περιοχές της ανασκαφής, αλλά σε κάποια σημεία έχει μερικά «τραβήγματα» (θόλωμα), που πιθανόν να οφείλονται σε ανωμαλίες του ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας. Για τις αδυναμίες που παρουσιάζει η ορθοφωτογραφία, δεν ευθύνεται αποκλειστικά το σύστημα αεροφωτογράφισης που χρησιμοποιήθηκε. Το αποτέλεσμα, θα βελτιωνόταν αισθητά, αν υπήρχαν μεγαλύτερες επικαλύψεις των αρχικών εικόνων.

4.7 Συνδυασμός εικόνων που έχουν συλλεχθεί από ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων και ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων σε ένα ενιαίο έργο

Μετά την εξέταση και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και των δύο συστημάτων αεροφωτογράφισης, διερευνήθηκε ο συνδυασμός όλων των δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 101 εικόνες, 64 εικόνες από το πρώτο έργο και 37 εικόνες από το δεύτερο (συνδυασμός λήψεων). Στην εικόνα, φαίνονται οι θέσεις λήψης των εικόνων και οι μεταξύ τους επικαλύψεις. Οι επικαλύψεις των εικόνων στη βασική περιοχή της ανασκαφής είναι μεγάλες και προσεγγίζουν αυτές του πρώτου έργου, με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν οι μισές εικόνες.



Εικόνα 54: Θέσεις λήψης των εικόνων και επικαλύψεις

Χρησιμοποιήθηκαν 55 επίγεια σημεία ελέγχου και το σύνολο των προβολών τους είναι 508. Υπολογίστηκε επίσης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των μετρήσεων: $RMS_{PIXEL}=0,66pixel$ και $RMS=0,049m$. Δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των σφαλμάτων του αεροτριγωνισμού. Τα σφάλματα στις παρατηρήσεις οφείλονται, κυρίως, στον βαθμό λεπτομέρειας και την ικανότητα αναγνώρισης στην εικόνα, στη διάθλαση ατμόσφαιρας, στην ακτινική διαστροφή, στην επιπεδότητα της ΦΕΕ, στην ακρίβεια του χειριστή και στα σφάλματα των Φ/Σ.

Πίνακας 23: Σύγκριση των συνορθώσεων κάθε περίπτωσης μελέτης

Σύστημα αεροφωτογράφισης	Octocopter	Swinglet Cam	Octocopter & Swinglet Cam
Αριθμός επίγειων	52	49	55

σημείων ελέγχου			
Σύνολο προβολών επίγειων σημείων ελέγχου	647	304	508
Αριθμός σημείων σύνδεσης	942.023	100.827	266.323
Σύνολο προβολών σημείων σύνδεσης	3.787.581	230.955	685.009
RMS_{PIXEL}	0,61	0,059	0,66
RMS	0,031	0,041	0,049

Η κατανομή των επίγειων σημείων ελέγχου φαίνεται στην Εικόνα 55. Είναι φανερό πως και στις τρεις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός φωτοσταθερών. Τα σημεία αυτά μετρήθηκαν για να καλύψουν τις ανάγκες και άλλων τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή, όπως οι σαρωτές λέιζερ, οι αετοί κ.ά. Αφού, λοιπόν, ήταν μετρημένα κρίθηκε σκόπιμη η αξιοποίηση τους κατά την επεξεργασία των εικόνων UAV. Ωστόσο, δεν είναι αναγκαίος αυτός ο αριθμός των φωτοσταθερών σε κάθε αποτύπωση που πραγματοποιείται με εικόνες UAV. Για την κάλυψη μιας ανάλογης περιοχής, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν 15-20 φωτοσταθερά. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ομοιόμορφη κατανομή τους (στα άκρα και στο κέντρο του μπλοκ) και η τοποθέτησή τους σε «έξυπνες» θέσεις. Εάν ένα σημείο μπορεί να μετρηθεί σε πολλές εικόνες συμβάλλει στην αύξηση του βαθμού ελευθερίας. Επίσης, με την χρήση συστημάτων GPS/INS, ο αριθμός των αναγκαίων φωτοσταθερών μειώνεται δραματικά, αλλά συνήθως απαιτείται η πτήση πρόσθετων λωρίδων κάθετων στις αρχικές. Η ενσωμάτωση συστημάτων GNSS στις MEEΠ, συμβάλλει ακόμη περισσότερο προς αυτή την κατεύθυνση, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας που έχει. Τα επίγεια σημεία ελέγχου μετρήθηκαν με συστήματα GNSS, χρησιμοποιώντας την μέθοδο του κινηματικού εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο.



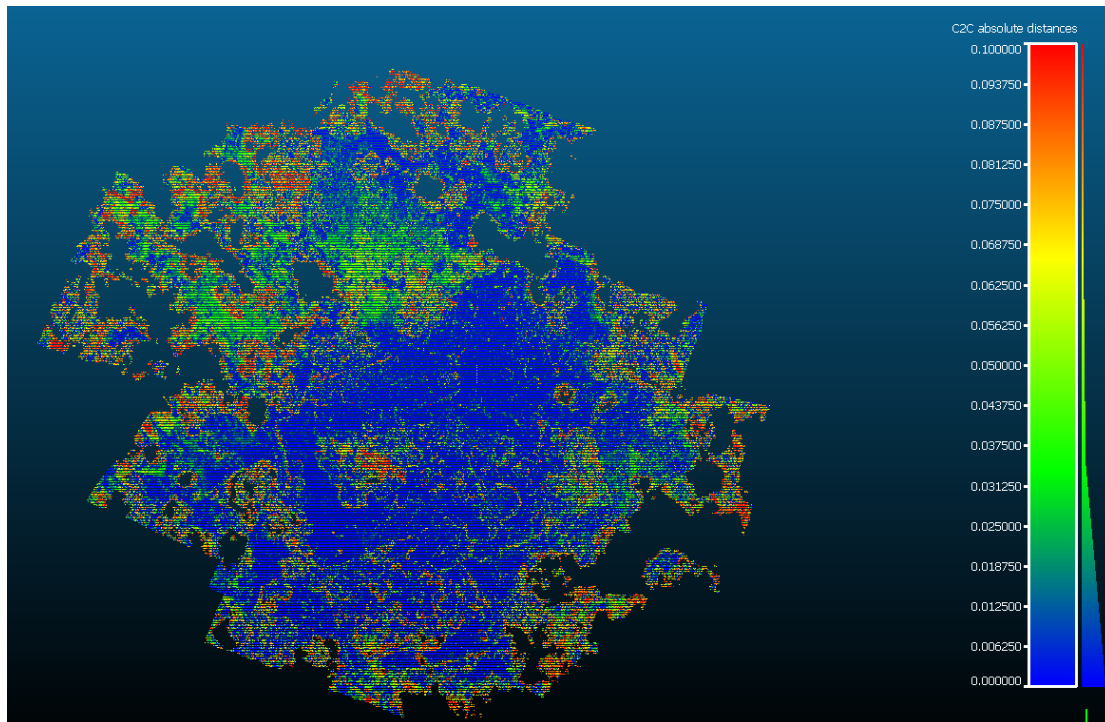
Εικόνα 55: Κατανομή επίγειων σημείων ελέγχου

Το αραιό νέφος σημείων που σχηματίστηκε αποτελείται από 266.323, ενώ το πυκνό νέφος σημείων αποτελείται από 55.469.565 σημεία. Μέσω του προγράμματος Cloud Compare, έγινε σύγκριση των τριών νεφών. Ως νέφος αναφοράς χρησιμοποιήθηκε το νέφος που δημιουργήθηκε από τον συνδυασμό των δεδομένων.

Πίνακας 24: Αριθμός σημείων κάθε νέφους

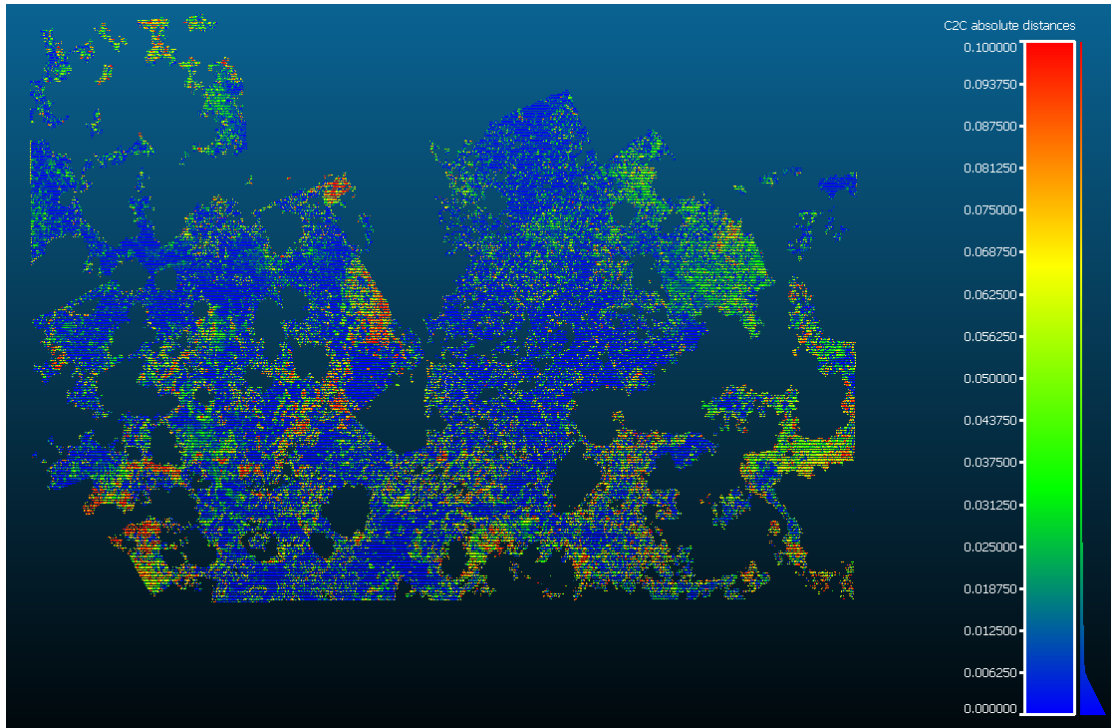
Σύστημα αεροφωτογράφισης	Octocopter	Swinglet Cam	Octocopter & Swinglet Cam
Αριθμός σημείων στις κοινές περιοχές	14.383.587	5.787.999	38.473.643

Η πρώτη σύγκριση έγινε μεταξύ του νέφους του πρώτου έργου και του νέφους αναφοράς. Η μέση απόσταση των δύο νεφών υπολογίστηκε 0,41 μέτρα ενώ η τυπική απόκλιση 1,1 μέτρα.



Εικόνα 56: Σύγκριση του νέφους σημείων του πρώτου και του τρίτου έργου

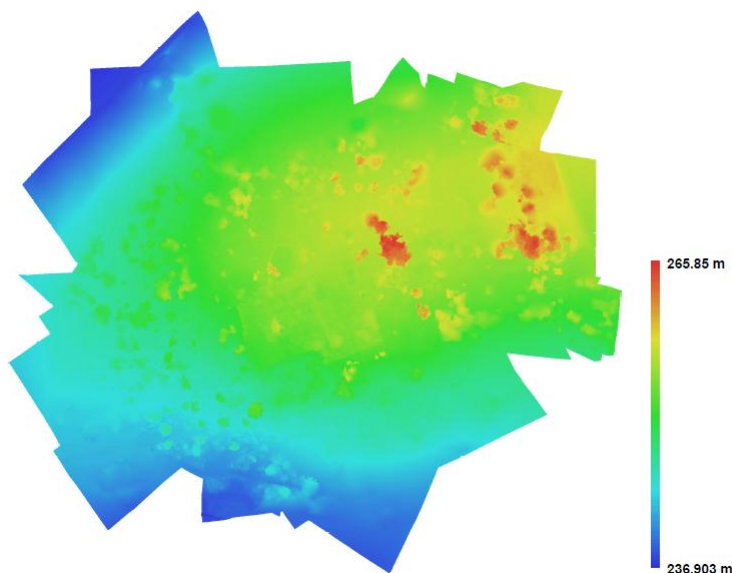
Η δεύτερη σύγκριση έγινε μεταξύ του νέφους του δεύτερου έργου και του νέφους αναφοράς. Η μέση απόσταση των δύο νεφών υπολογίστηκε 0,036 μέτρα ενώ η τυπική απόκλιση 0,13 μέτρα.



Εικόνα 57: Σύγκριση του νέφους σημείων του δεύτερου και του τρίτου έργου

Υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των θέσεων και των στροφών κάθε εικόνας, και ως εκ τούτου δημιουργείται υψηλή πολλαπλότητα σημείων. Το νέφος σημείων που προέκυψε από τον συνδυασμό των δεδομένων, είναι 2,5 φορές πιο πυκνό από το νέφος που δημιουργήθηκε στο πρώτο έργο και σχεδόν 7 φορές από το δεύτερο.

Το ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας έχει εύρος τιμών υψομέτρων από τα 236,903 μέτρα έως τα 265,85 μέτρα. Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας του είναι 0.0215033 μέτρα και απεικονίζονται κατά μέσο όρο 2.162,67 σημεία ανά τετραγωνικό.



Εικόνα 58: Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας

Συγκρίνονται το μέγεθος της εδαφοψηφίδας και η πυκνότητα των σημείων των ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας που παράχθηκαν και στις τρεις περιπτώσεις.

Πίνακας 25: Σύγκριση των ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας

Σύστημα αεροφωτογράφισης	Octocopter	Swinglet Cam	Octocopter & Swinglet Cam
Μέγεθος εδαφοψηφίδας	0,016	0,021	0,021
Ποκνότητα σημείων	3582,15 σημεία/τ.μ	2.258,46/τ.μ.	2.162,67

Στην Εικόνα 59, φαίνεται το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο της περιοχής.



Εικόνα 59: Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο

Στις περιοχές όπου η επικάλυψη είναι μεγάλη, η αναπαράσταση του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και είναι παρόμοια με αυτήν του πρώτου έργου. Όμως, στα άκρα της εικόνας, όπου οι επικαλύψεις των εικόνων δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλες, δεν αποδίδονται καλά οι περιοχές με έντονη βλάστηση.

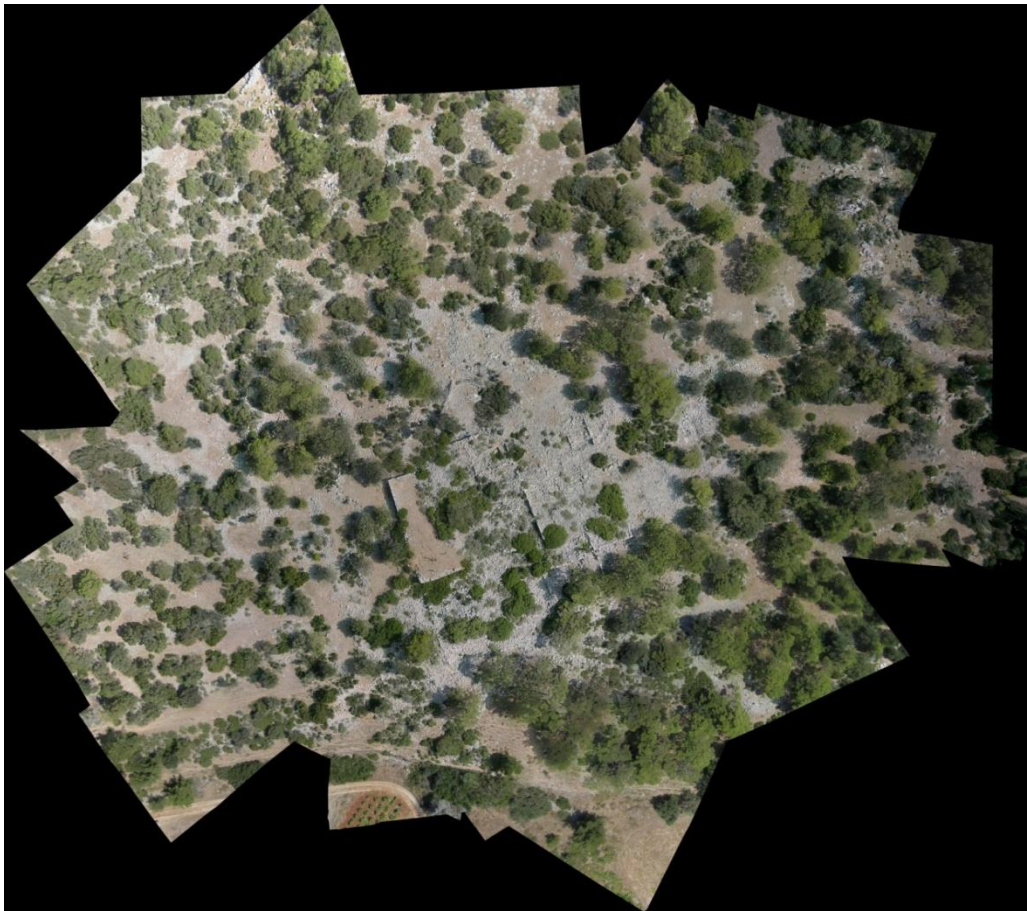
Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας επιλέχθηκε το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ 87) και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας. Συγκεκριμένα, ορίστηκε GSD=0.04m και επομένως η κλίμακα απόδοσης είναι 1:400.

Στο παράρτημα, υπάρχουν οι επιμέρους συγκρίσεις των βασικών μερών της ανασκαφής και των αντίστοιχων συστημάτων αεροφωτογράφισης που χρησιμοποιήθηκαν. Από την σύγκριση προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η ορθοφωτογραφία που προέκυψε συνδυάζοντας δεδομένα, είναι σαφώς καλύτερη ποιοτικά από την ορθοφωτογραφία του δεύτερου έργου. Έχουν και

οι δύο την ίδια κλίμακα, αλλά αποτυπώνονται περισσότερες λεπτομέρειες και μειώθηκαν κατά πολύ τα «τραβήγματα» της εικόνας.

- Η ορθοφωτογραφία αυτή με την ορθοφωτογραφία του πρώτου έργου είναι εξίσου καλές ποιοτικά. Διαθέτει μεν μικρότερη κλίμακα, σε σχέση με την πρώτη, αλλά η οριζοντιογραφική της ακρίβεια είναι εξίσου καλή. Επίσης, είναι πιο φωτεινή σε σχέση με την πρώτη, η οποία χρειάστηκε ραδιομετρική επεξεργασία.



Εικόνα 60: Ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:400

Συνοψίζοντας, ο συνδυασμός εικόνων από διαφορετικά ύψη πτήσης αλλά και διαφορετικών συστημάτων αεροφωτογράφισης, βελτιώνει το αποτέλεσμα, αφού ενισχύεται η γεωμετρία του μπλοκ και αυξάνονται οι επικαλύψεις των εικόνων. Ως εκ τούτου, προκύπτουν πυκνότερα νέφη σημείων και καλύτερα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας. Στον πίνακα που ακολουθεί, γίνεται η σύγκριση όλων των παραγώγων που προέκυψαν και στις τρεις περιπτώσεις μελέτης. Η κλίμακα σύγκρισης κυμαίνεται από το 1 έως το 3, με το 3 να είναι η ευνοϊκότερη τιμή.

Πίνακας 26: Συνοπτική σύγκριση των αποτελεσμάτων

Σύστημα αεροφωτογράφισης	Octocopter	Swinglet Cam	Octocopter & Swinglet Cam
Πυκνό νέφος σημείων	2	1	3
Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας	3	1	2
Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο	3	1	3
Ορθοφωτογραφία	3	2	3
Συνολικός χρόνος επεξεργασίας	1	3	2

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για την παραγωγή των αποτελεσμάτων είναι μικρός. Για τον προγραμματισμό και την εκτέλεση της πτήσης αρκούν μερικές ώρες. Στη συνέχεια, χάρη στον βαθμό αυτοματοποίησης των προγραμμάτων που κυκλοφορούν, είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε διάστημα μιας ημέρας. Συγκεκριμένα, ο μεγαλύτερος χρόνος επεξεργασίας απαιτήθηκε στην περίπτωση του πρώτου έργου, αφού ήταν πολύ μεγαλύτερο το πλήθος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πιο σύντομη επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στο δεύτερο έργο.

Πίνακας 27: Σύγκριση του χρόνου επεξεργασίας σε κάθε έργο

Σύστημα αεροφωτογράφισης	Octocopter	Swinglet Cam	Octocopter & Swinglet Cam
Πυκνό νέφος σημείων	48h	10h	20h
Ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας	10h	5h	8h
Τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο	55h	14h	23h
Ορθοφωτογραφία	56h	15h	24h
Συνολικός χρόνος επεξεργασίας	Περίπου 2,5 ημέρες	Λιγότερο από μία ημέρα	Μία ημέρα

Οι τιμές των μικρών ΜΕΕΠ που χρησιμοποιούνται σε αυτού του είδους τις αποτυπώσεις κυμαίνονται, συνήθως, από 7.000 έως 10.000 ευρώ. Το λογισμικό Photoscan κοστίζει 3.500 ευρώ. Το κόστος της ανθρώπινης εργασίας είναι επίσης, χαμηλό, χάρη στον λίγο χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία των δεδομένων. Προσμετρώντας όλα αυτά τα κόστη, συμπεραίνεται πως η χρήση των συστημάτων αυτών παραμένει η οικονομικότερη δυνατή, ειδικά σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως οι σαρώσεις λείζερ και οι επανδρωμένες αεροφωτογραφίες.

4.8 Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από υπέρυθρες εικόνες που έχουν συλλεχθεί από ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων

4.8.1 Συλλογή δεδομένων

Για την συλλογή των υπέρυθρων εικόνων χρησιμοποιήθηκε η ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων Swinglet Cam της εταιρείας Sensefly και η ψηφιακή μηχανή Canon PowerShot ELPH 300HS.

Πραγματοποιήθηκαν 2 πτήσεις. Το υψόμετρο της πρώτης πτήσης κυμαινόταν από 60 έως 90 μέτρα και πάρθηκαν 96 εικόνες. Η δεύτερη πτήση, πραγματοποιήθηκε την επόμενη μέρα, σε υψόμετρο 120 μέτρα και πάρθηκαν 90 εικόνες.

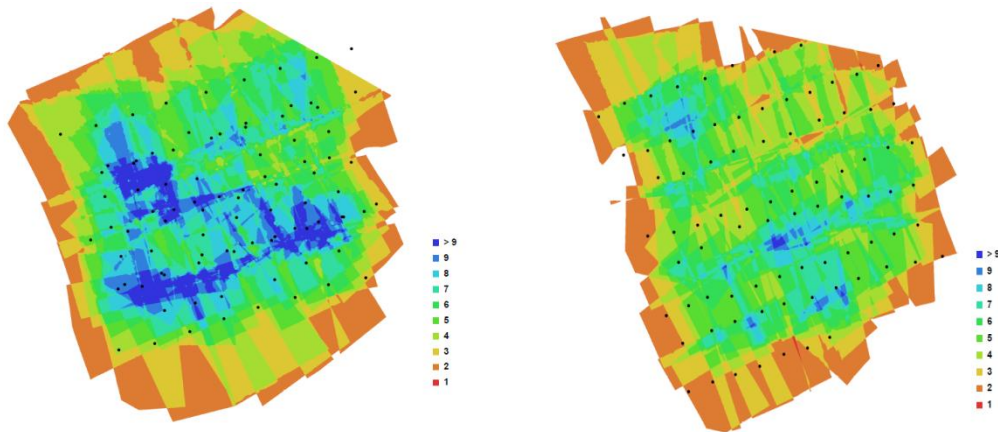


Εικόνα 61: Σχέδια πτήσης στο Google Earth (πρώτη πτήση αριστερά, δεύτερη πτήση δεξιά)

Πρώτη πτήση: Η κλίμακα αεροφωτογράφισης δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$, οπότε για $c=4,3\text{mm}$ και ύψος πτήσης 90m είναι $K=1/20.930$. Επομένως, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας είναι ίσο με $31,4\text{mm}=0,031\text{m}$.

Δεύτερη πτήση: Η κλίμακα αεροφωτογράφισης δίνεται από τη σχέση $\frac{1}{K} = \frac{c}{H}$, οπότε για $c=4,3\text{mm}$ και ύψος πτήσης 120m είναι $K= 1/27.907$. Επομένως, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της αρχικής εικόνας είναι ίσο με $41,9\text{mm}=0,041\text{m}$.

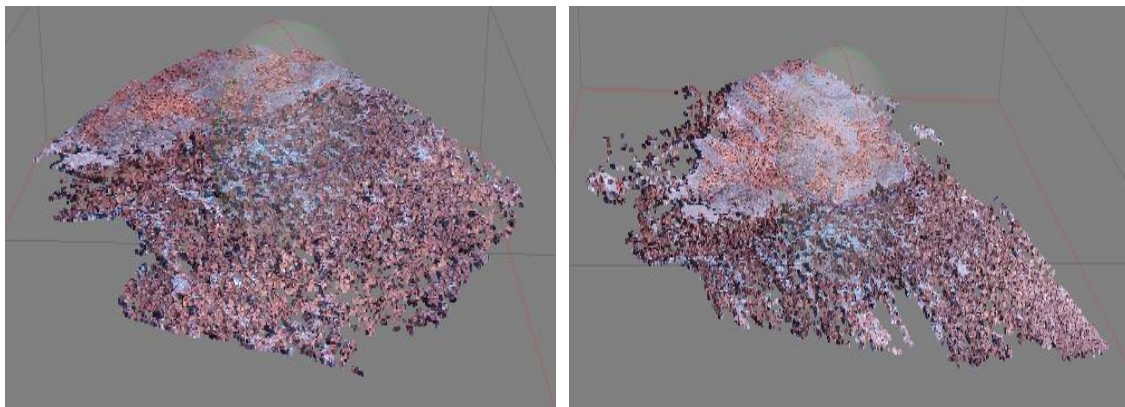
Οι θέσεις λήψης των εικόνων και οι μεταξύ τους επικαλύψεις φαίνονται στην Εικόνα 62. Οι επικαλύψεις των εικόνων της πρώτης πτήσης είναι μεγαλύτερες σε σχέση με της δεύτερης.



Εικόνα 62: Θέσεις λήψης των εικόνων και επικαλύψεις της πρώτης (αριστερά) και της δεύτερης πτήσης (δεξιά)

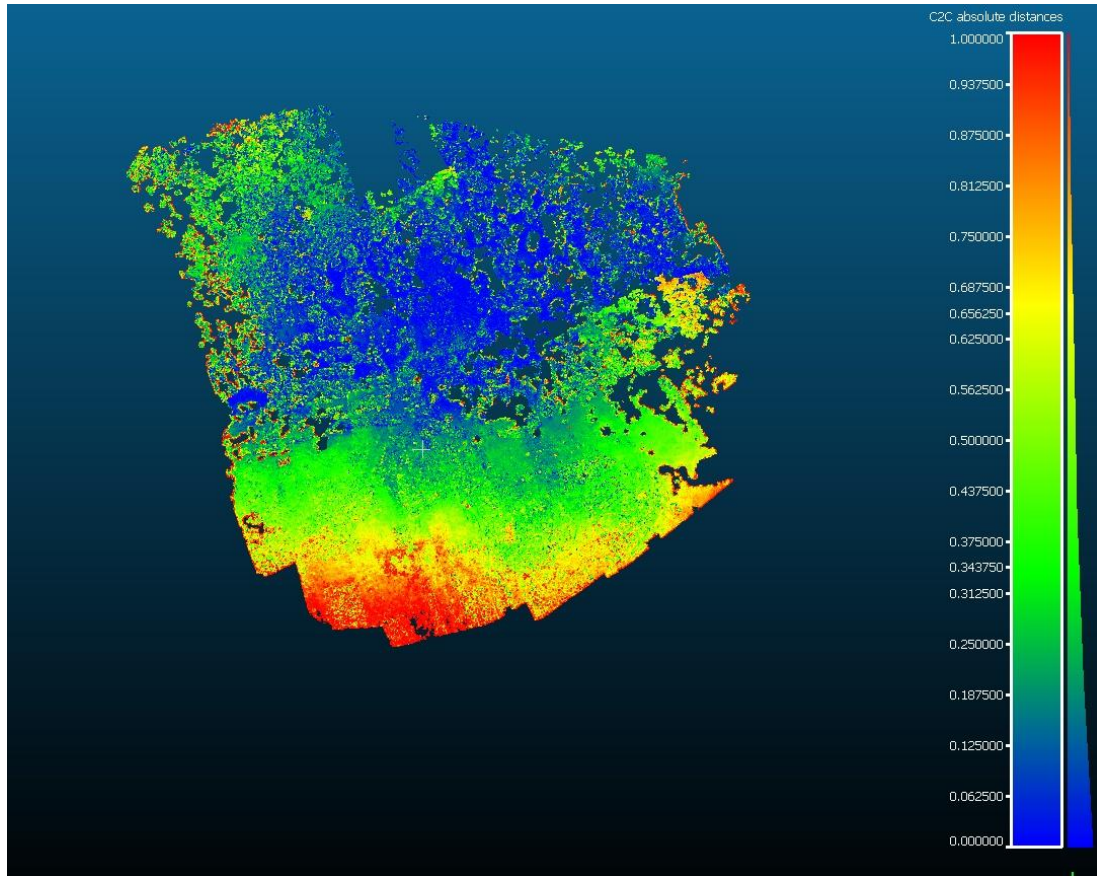
4.8.2 Αποτελέσματα από την φωτογραμμετρική επεξεργασία στο Photoscan

Το νέφος σημείων της πρώτης πτήσης αποτελείται από 33.975.081 σημεία, ενώ της δεύτερης από 39.325.149.



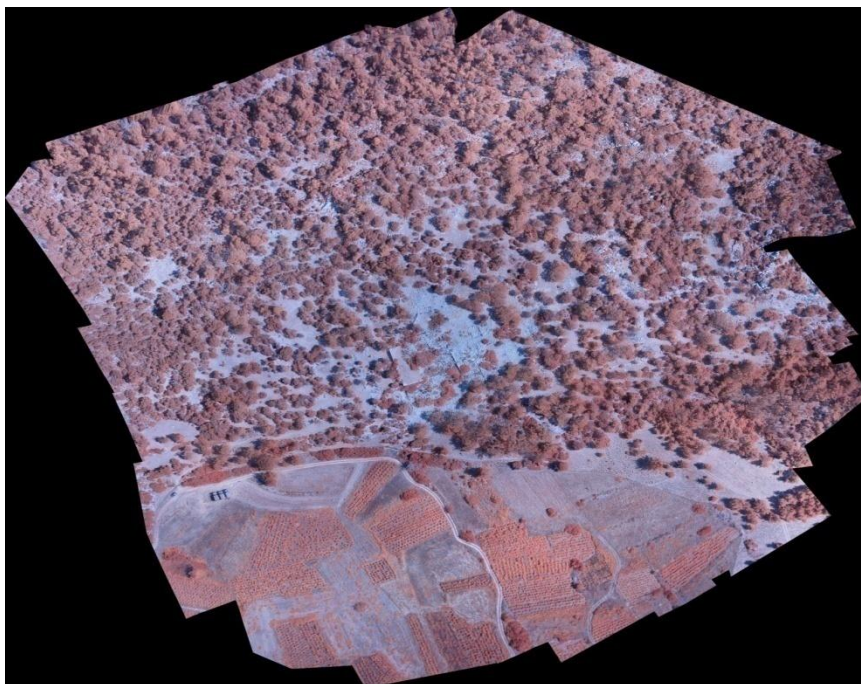
Εικόνα 63: Πυκνά νέφη σημείων στο Photoscan (αριστερά είναι της πρώτης πτήσης, δεξιά της δεύτερης)

Συγκρίθηκαν στο πρόγραμμα Cloud Compare, χρησιμοποιώντας ως νέφος αναφοράς της δεύτερης πτήσης, επειδή αποτελείται από περισσότερα σημεία. Η μέση απόσταση των δύο νεφών είναι ίση με 3,42 μέτρα, ενώ η τυπική απόκλιση 9,48 μέτρα. Στην περιοχή της ανασκαφής, η οποία αποτελείται από ερείπια και πυκνή βλάστηση, οι διαφορές είναι της τάξεως μερικών εκατοστών. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις περιοχές που απεικονίζουν καλλιέργειες, εκτός της περιοχής μελέτης. Πιθανόν, να οφείλονται στην απότομη αλλαγή του υψομέτρου καθώς και στις μικρές επικαλύψεις των εικόνων στην περιοχή αυτή.



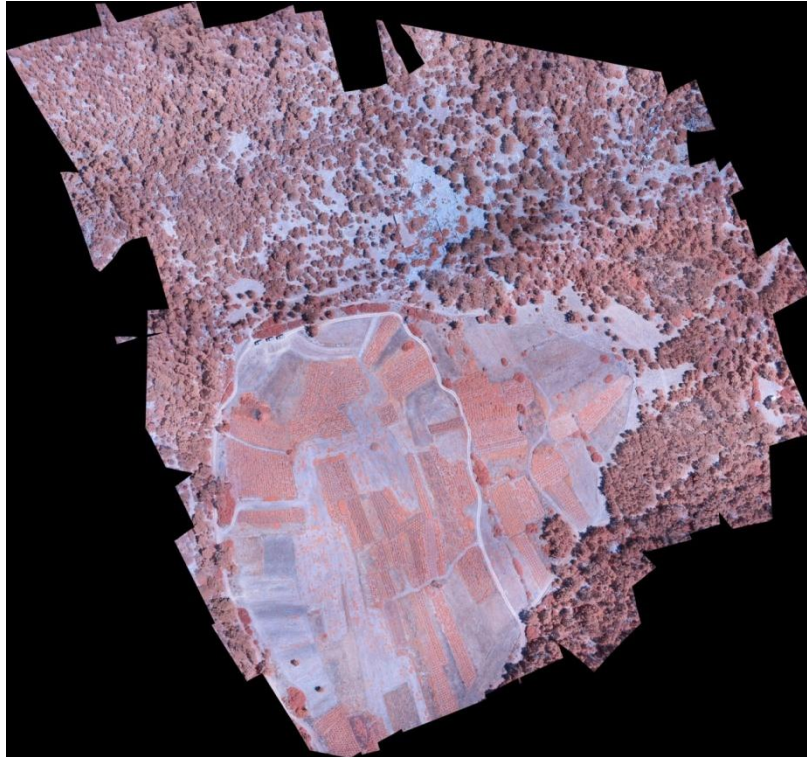
Εικόνα 64: Σύγκριση νεφών σημείων στο Cloud Compare

Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας της ορθοφωτογραφίας ορίστηκε και στις 2 περιπτώσεις ίσο με 0,05μ. Επομένως, η κλίμακα απόδοσης είναι 1:500.



Εικόνα 65: Ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:500 της πρώτης πτήσης

Στην πρώτη ορθοφωτογραφία αποτυπώθηκαν καλύτερα τα βασικά μέρη της ανασκαφής σε σχέση με τη δεύτερη. Όμως, η υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιείται στην Τηλεπισκόπηση για την παρακολούθηση της βλάστησης και της γεωργίας. Τα αποτελέσματα και των δύο ορθοφωτογραφιών ήταν αρκετά ικανοποιητικά και πολλά υποσχόμενα σε αυτό το πεδίο εφαρμογών. Εν τούτοις, παρατηρήθηκαν λίγα «τραβήγματα» σε μερικά σημεία των εικόνων.



Εικόνα 66: Ορθοφωτογραφία σε κλίμακα 1:500 της δεύτερης πτήσης

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διερεύνηση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Αναφέρονται επίσης, μερικά θέματα και προοπτικές για την περαιτέρω εξέλιξη τους.

5.1 Συμπεράσματα

Η χρήση των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης αποτελεί ένα από τους πιο γρήγορους και οικονομικούς τρόπους συλλογής δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, ορθοφωτογραφιών και τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων. Χαρακτηρίζεται από ευελιξία και υπάρχει δυνατότητα εκτέλεσης συχνών πτήσεων χωρίς μεγάλο κόστος.

Σημαντικό πλεονέκτημα των σύγχρονων συστημάτων αποτελεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης διαφόρων ειδών αισθητήρων όπως, ψηφιακές μηχανές, πολυφασματικοί και υπερφασματικοί σαρωτές, συστήματα LiDAR και δέκτες SAR. Ευρεία είναι η χρήση ερασιτεχνικών ψηφιακών μηχανών λόγω της δυνατότητας βαθμονόμησης τους με ικανοποιητική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας λίγα επίγεια σημεία ελέγχου και αυτοματοποιημένα λογισμικά.

Διαπιστώθηκε εκτεταμένη χρήση σε πληθώρα εφαρμογών κυρίως στον τομέα της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ως εκ τούτου, συστήνεται ο συνδυασμός με άλλες μεθόδους και τεχνικές αποτύπωσης για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Τα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης δεν αντικαθιστούν τα αντίστοιχα επανδρωμένα με αισθητήρες μεγάλου εστιακού επιπέδου, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν επικουρικά σε περιοχές με μικρό φάσμα κάλυψης.

Η τοποθέτηση επιπρόσθετων αισθητήρων πλοήγησης, όπως τα συστήματα GNSS και INS, συντέλεσε στην αυτόνομη λειτουργία πλοήγησης των συστημάτων αυτών. Σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση συστημάτων προσομοίωσης πτήσης, επιτυγχάνεται ακριβής συλλογή εικόνων και τήρηση των παραμέτρων του προγραμματισμού πτήσης. Συγκρίνοντας, τον προσανατολισμό λήψης των εικόνων και στους τρεις τρόπους πλοήγησης (χειροκίνητη, μερικώς υποβοηθούμενη και αυτόνομη), διαπιστώθηκε μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την αυτόνομη λειτουργία, σε αντίθεση με τους άλλους δύο τρόπους.

Για την φωτογραμμετρική επεξεργασία των εικόνων UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοματοποιημένα προγράμματα καθώς και παραδοσιακοί ψηφιακοί φωτογραμμετρικοί σταθμοί. Κατά την πρακτική εφαρμογή, η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Photoscan, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης. Από την αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Οι ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων ενδείκνυνται για αποτυπώσεις μεγάλης κλίμακας, αφού πετούν σε χαμηλότερα ύψη πτήσης. Είναι πιο σταθερές

πλατφόρμες λήψης και ως εκ τούτου, οι εικόνες που λαμβάνονται είναι ευκρινείς (νετ).

- Οι ΜΕΕΠ σταθερών πτερυγίων έχουν μεγαλύτερο φάσμα κάλυψης καθώς πετούν σε μεγαλύτερα ύψη, με αποτέλεσμα να έχουν μικρότερες δυνατές κλίμακες απόδοσης. Ενδείκνυνται κυρίως για τη χαρτογράφηση περιοχών μεσαίας έκτασης.
- Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ύψος πτήσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της ΜΕΕΠ.
- Κατά τη διαδικασία συλλογής των εικόνων πρέπει να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, αναφορικά με τον προσανατολισμό τους, τις συνθήκες φωτισμού και την επικαλυπτόμενη περιοχή. Κατά την αξιολόγηση των ψηφιακών μοντέλων επιφάνειας, των ορθοφωτογραφιών και των τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων, που παράχθηκαν και στις δύο περιπτώσεις, διαπιστώθηκε πως το μέγεθος της επικάλυψης των εικόνων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα των αποτελεσμάτων.
- Όταν η κατά μήκος και η κατά πλάτος επικάλυψη είναι της τάξης 80% και 60% αντίστοιχα, παράγονται πολύ πυκνά νέφη σημείων. Ωφέλιμος είναι και ο συνδυασμός εικόνων από διαφορετικά ύψη πτήσης, αφού πολλαπλασιάζονται τα ομόλογα σημεία μεταξύ των εικόνων και ως εκ τούτου, δημιουργούνται πυκνότερα νέφη σημείων, άρα και καλύτερα ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας. Όσο πιο πυκνό είναι το ΨΜΕ, τόσο βελτιώνεται και η ποιότητα της ορθοφωτογραφίας.
- Κρίσιμος παράγοντας σε ένα έργο είναι και το μέγεθος του pixel της ψηφιακής μηχανής που θα χρησιμοποιηθεί. Αφού, σε συνδυασμό με το ύψος πτήσης και την εστιακή απόσταση, καθορίζεται και το μέγεθος της εδαφοψηφίδας των αρχικών εικόνων.
- Με την ΜΕΕΠ πολλαπλών στροφείων συλλέχθηκαν υπέρυθρες εικόνες. Η υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιείται στην Τηλεπισκόπηση για την παρακολούθηση της βλάστησης και της γεωργίας. Τα αποτελέσματα και των δύο ορθοφωτογραφιών ήταν αρκετά ικανοποιητικά και πολλά υποσχόμενα σε αυτό το πεδίο εφαρμογών.
- Συνοψίζοντας, σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, τα φωτογραμμετρικά προϊόντα (τρειςδιάστατα ψηφιακά μοντέλα, ορθοφωτογραφίες και ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας) παράχθηκαν με επιτυχία.
- Πλέον, λόγω της αυτόνομης λειτουργίας πλοήγησης και των αυτοματοποιημένων προγραμμάτων που κυκλοφορούν, η εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι εύκολη και γρήγορη και απευθύνεται ακόμη και σε μη εξειδικευμένους χρήστες.

5.2 Μελλοντικές Προοπτικές

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση και την αποτελεσματικότητα των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης.

Αν και οι σύγχρονες ΜΕΕΠ είναι αρκετά αυτόνομες, δεν έχουν την ικανότητα να αποφύγουν τυχόν εμπόδια κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η επίλυση αυτού του ζητήματος είναι πρωταρχική αφού μπορούν να αποφευχθούν ατυχήματα και ζημιές. Το ζήτημα της ασφάλειας των συστημάτων αυτών αποτελεί τροχοπέδη για την διάδοσή τους, από νομοθετική άποψη.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των μη επανδρωμένων συστημάτων αεροφωτογράφισης είναι η εξάρτησή τους από τις καιρικές συνθήκες και ειδικά από την ταχύτητα του ανέμου. Οι πιο σύγχρονες ΜΕΕΠ διαθέτουν ειδικά συστήματα σταθεροποίησης της πλατφόρμας ή του φορτίου. Η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες αποτελεί σημαντικό ζήτημα και για την ασφάλεια των συστημάτων αυτών, καθώς υπάρχει αυξημένος κίνδυνος κατάρριψης. Συστήνεται επομένως, περαιτέρω βελτίωση των μηχανισμών σταθεροποίησης και ενσωμάτωση τους σε περισσότερα συστήματα.

Η σύζευξη των οπτικών αισθητήρων με τα συστήματα GNSS και INS, μπορεί να δώσει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, αφού οι εικόνες που θα λαμβάνονται από τις ΜΕΕΠ θα είναι άμεσα γεωαναφερμένες και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Με αυτό τον τρόπο, θα ενισχυθεί η δυνατότητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και θα βελτιωθεί η ακρίβεια πλοήγησης.

Εν κατακλείδι, τα μη επανδρωμένα συστήματα αεροφωτογράφισης έχουν τεθεί σε εφαρμογή με μεγάλη επιτυχία. Ωστόσο, προϋπόθεση για περαιτέρω εκτεταμένη χρήση αποτελεί η θέσπιση νομοθεσίας με εναρμονισμένους κανονισμούς στην Ευρώπη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Κούτρας Ν. (2013). *Χρήση των RPAS για την Προστασία Κρίσιμων Υποδομών και την Επιτήρηση Συνόρων*. 12th Exposec Conference

Σκαρλάτος Δ. (2012). *Αυτόνομες πλατφόρμες αεροφωτογράφισης και εφαρμογές τους για χαρτογράφηση*. Ανοιχτή διάλεξη, σε συνεργασία ΑΗΚ & ΤΕΠΙΑΚ.

Acevedo Pardo C., Farjas M., Georgopoulos A., Mielczarek M., Parenti R., Parseliunas E., Schramm T., Skarlatos D., Stefanakis E., Tapinaki S., Tucci G., Zazo A. and a team of 40 students. Experiences gained from the Erasmus Intensive Programme Herict 2013. 6th International Conference of Education, Research and Innovation Seville - 18th-20th November 2013.

Brucas D., Suziedelyte-Visockiene J., Ragauskas U., Berteska E., Rudinskas D. (2013). *Implementation and Testing of Low Cost UAV Platform for Orthophoto Imaging*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, Volume XL-1W2, 2013.

Conte G., Rudol P., Doherty P. (2014). *Evaluation of a light-weight Lidar and a Photogrammetric System for Unmanned Airborne Mapping Applications*. PFG 2014, Stuttgart.

Cramer M. (2014). *Using Remotely Piloted Aircraft Systems for Data Collection and Point Cloud Generation*. Institute for Photogrammetry, Stuttgart.

Eisenbeiss H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Doctoral Dissertation, ETH Zurich.

Georgopoulos A. (1981). *Low altitude non-metric photography in surveying*. Doctoral Dissertation, University of London.

Greiwe A., Gehrke R., Spreckels V., Schlienkamp A (2013). *Aspects of DEM Generation from UAS Imagery*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, Volume XL-1W2, 2013.

Haala N., Cramer M., Rothermel M. (2013). *Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, Volume XL-1W2, 2013.

Michaelides-Mateou S., Erotokritou C. (2014). *RPAS Manual: A guide to national RPAS Legislation*. RPAS Yearbook, 12th edition.

Ενδεικτικοί Ιστότοποι

<http://www.bill-blake.co.uk>

<http://www.geo-matching.com>

<http://www.uav-g.org>

<http://www.isprs.com>







<http://www.agisoft.com>

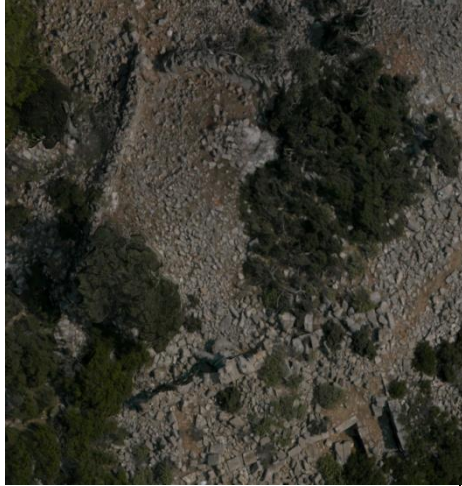



<http://uas.trimble.com>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Α



Η σύγκριση των ορθοφωτογραφιών του πρώτου και του δεύτερου έργου σε κάθε μέρος της ανασκαφής ξεχωριστά.





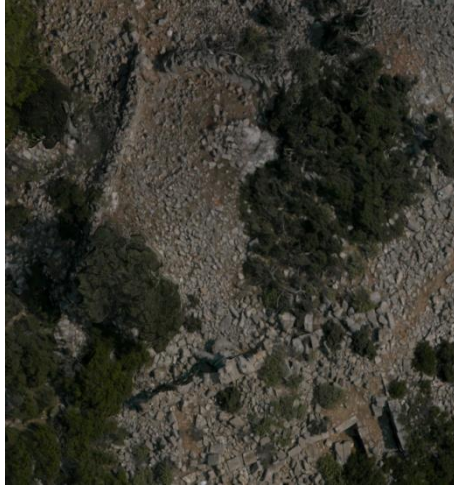
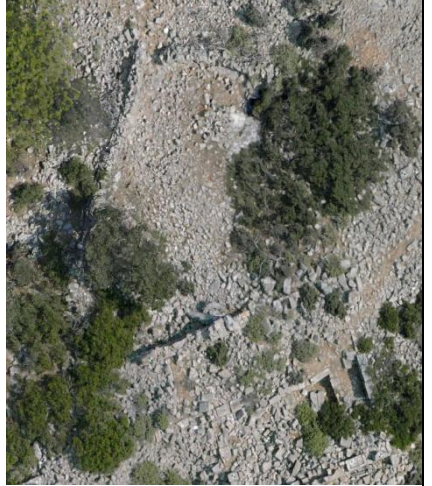


Μέρος της ανασκαφής	Octocopter	Swinglet Cam
Δωμάτιο 1		
Δωμάτιο 2		
Δωμάτιο 3		

Δωμάτιο 4		
Δωμάτιο 5		

Παράρτημα Β





Η σύγκριση των ορθοφωτογραφιών του πρώτου και του τρίτου έργου σε κάθε μέρος της ανασκαφής ξεχωριστά.

Μέρος της ανασκαφής	Octocopter	Συνδυασμός Octocopter και Swinglet Cam
Δωμάτιο 1		

Δωμάτιο 2		
Δωμάτιο 3		
Δωμάτιο 4		
Δωμάτιο 5		

Παράρτημα Γ

Η σύγκριση των ορθοφωτογραφιών του δεύτερου και του τρίτου έργου σε κάθε μέρος της ανασκαφής ξεχωριστά.

Μέρος της ανασκαφής	Swinglet Cam	Συνδυασμός Octocopter και Swinglet Cam
Δωμάτιο 1		
Δωμάτιο 2		
Δωμάτιο 3	