

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

# Θερμική καταγραφή εισροής υδάτων στο τεχνητό φράγμα Ποταμών, Ρεθύμνου, με πρότυπο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα

Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτης Α. Ζερβός

Εξεταστική Επιτροπή

Παναγιώτης Παρτσινέβελος, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής
Διονυσία Κολωκοτσά, Επίκουρος Καθηγήτρια

Χανιά
Μάρτιος, 2014

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την κατασκευή μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος (Unmanned Aerial Vehicle: UAV), με χαμηλό κόστος, για τη λήψη τηλεπισκοπικών θερμικών εικόνων ώστε να εντοπισθούν, αποτυπωθούν, και αξιολογηθούν εισροές ύδατος στον ταμιευτήρα του φράγματος Αμαρίου, Ρεθύμνου, Κρήτης. Η ιπτάμενη αυτή πλατφόρμα αναπτύχθηκε με σκοπό την αξιοποίηση καινοτόμων εφαρμογών στα αντικείμενα του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων.

Η εργασία αυτή περιλαμβάνει επίσης την επεξεργασία θερμικών εικόνων της περιοχής, τις γεωμετρικές αναγωγές τους, τη δημιουργία δύο μωσαϊκών από συνένωση 370 λήψεων για λεπτομερή χαρτογράφηση και αποτύπωση ακόμη και απρόβλεπτων εισροών ύδατος στον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια, η πληροφορία των εικόνων μετασχηματίσθηκε στο τοπικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς συντεταγμένων ώστε η ίδια να συσχετισθεί με το έδαφος, χρησιμοποιώντας φωτοσταθερά (θερμικοί στόχοι) κατά την ημέρα της θερμικής καταγραφής.

Η συγκεκριμένη θερμική χαρτογράφηση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με ιπτάμενη πλατφόρμα και θερμικούς αισθητήρες, επειδή πλεονεκτούν σε σχέση με επίγειες και συμβατικές τηλεπισκοπικές μεθόδους, για ταχεία και αποτελεσματική σάρωση δύσβατων περιοχών. Η εφαρμοσμένη θερμική χαρτογράφηση αποτύπωσε θερμοκρασιακές διαφορές αποτελεσματικά (ουδέποτε εφαρμόστηκε αντίστοιχη μελέτη μετά από την κατασκευή του το 2009 από τον Οργανισμό Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης) ανάμεσα σε υγρά και ξηρά εδάφη και συνετέλεσε στο να διαχωριστούν ξεκάθαρα οι ιδιότητες τους και τα χαρακτηριστικά τους. Η περιοχή που αποτυπώθηκε είναι η νότια πλευρά του φράγματος, στην οποία γίνεται η κύρια τροφοδοσία του ταμιευτήρα από το φαράγγι του Αγίου Αντωνίου και την αναβάλουσα πηγή «Κεφαλοβρύσσα».

Αρχικά, κατασκευάστηκε η πρότυπη μη επανδρωμένη ιπτάμενη πλατφόρμα, με τη μορφή εξακόπτερου. Στη συνέχεια προσαρμόστηκε πάνω της ο θερμικός αισθητήρας και το σύστημα ασύρματης μετάδοσης δεδομένων, για την αποστολή καταγραμμένων εικόνων σε σταθμό εδάφους. Η ιπτάμενη πλατφόρμα έφερε επίσης, σύστημα αυτόματης πλοήγησης, που μπορούσε να καθοδηγήσει το σκάφος σε προκαθορισμένα σημεία αναφοράς (waypoints) μέσω του συστήματος δορυφορικού εντοπισμού (Global Positioning System: GPS). Η αυτονομία του ιπτάμενου συστήματος ήταν 10 min, με μέγιστο βάρος απογείωσης τα 5,5 kg. Μέσω της αυτόματης πλοήγησης αλλά και του χειριστηρίου τηλεκατεύθυνσης, πραγματοποιήθηκαν οι πτήσεις της θερμικής αποτύπωσης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η έκταση που καλύφθηκε

ήταν 1.200 $m^2$ και δημιουργήθηκαν δυο μωσαϊκά: ένα για την πρωινή και ένα για την μεσημεριανή θερμική καταγραφή.

Τέλος, μετά την επεξεργασία και ερμηνεία των μωσαϊκών αυτών, ανιχνεύθηκε ανεπιθύμητη εισροή ύδατος σε συγκεκριμένη θέση του ταμιευτήρα, δίπλα από το ποτάμι της κύριας τροφοδοσίας, η οποία αποτελεί αξιοποιήσιμη πληροφορία για τον διαχειριστή του φράγματος Αμαρίου. Η ιπτάμενη πλατφόρμα θα παραμείνει στο Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για περαιτέρω εξέλιξη και εφαρμογές άλλων δραστηριοτήτων στα αντικείμενα Μηχανικών.

## Abstract

The purpose of the current dissertation is the low-cost construction of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for the reception of remote-sensing thermal images, so that the water inflow in the artificial dam reservoirs, Potamoi, Amari, Rethymno, Crete can be located, imprinted and assessed. This flying platform has been developed aiming to make the most of innovative applications, related to the Science of the Engineer of Mineral Resources.

This study also includes the process of thermal images of the area, their geometric reductions and the creation of two mosaics, through the combination of 370 shots for the detailed mapping and imprinting, even of the unpredictable water inflows in the reservoir. Then, the image information was transformed in the local geodetic coordinate reference system, so that it could be correlated with the ground, using photostable (thermal targets) during the day of the thermal recording.

This particular thermal mapping has been selected to be conducted by means of a flying platform and thermal sensors, because the latter has an advantage over the ground and conventional remote sensing methods, for fast and more effective scanning of inaccessible areas. The applied thermal mapping imprinted temperature differences effectively (a related study was never conducted after its construction in 2009 by Organization for the Development of Western Crete) between the wet and dry soils and contributed to the clear separation of their properties and characteristics. The imprinted area is the southern side of the dam in which the main feed of the reservoirs takes place, fed by the St. Antonios gorge and the Kefalovryssa spring.

At first, the prototype unmanned aerial platform was constructed as a hexacopter. Then, the thermal sensor and the wireless transmission data system were adapted on it, with the aim to transmit image data to a ground station. The flying platform had also an autopilot system, which could lead the craft to specific waypoints through the GPS (Global Positioning System) system. The autonomy of this flying system was 10 minutes for 5.5 kg maximum takeoff weight. The flights of thermal imprinting were conducted in the area of interest by means of the autopilot system and use of remote control. The covered area was 1.200 $m^2$ and two mosaics were created: one for the morning and one for the midday thermal recording.

Finally, after those mosaics were processed and interpreted, an unwanted water inflow in a specific position of the reservoir was detected, next to the river of the main feeding, which is a valuable source of information for the administrator of Amari dam. The flying platform will remain in the Laboratory of Geodesy and Geomatics Enigineering of the Technical University

of Crete and it can become a point of reference for further development of the branch of UAVs in this University.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και αποτελεί το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή. Το κίνητρο για την εκπόνηση της εργασίας δόθηκε από τον Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, Καθηγητή Στέλιο Μερτίκα, ο οποίος κατάφερε να συνδυάσει το προσωπικό μου ενδιαφέρον για τον κλάδο των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων με τον επιστημονικό κλάδο των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων σε καινοτόμες εφαρμογές και την ανάπτυξη πρωτότυπης εναέριας πλατφόρμας.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω να δώσω στο σύνολο της εξεταστικής μου επιτροπής και ιδιαίτερα στον Επίκουρο Καθηγητή Παναγιώτη Παρτσινέβελο, ο οποίος συνεπικούρησε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά και επένδυσε χρηματικό κονδύλι, για την κατασκευή του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος, δείχνοντας εμπιστοσύνη στο όλο εγχείρημά μου. Επίσης ευχαριστώ τον Καθηγητή Αναστάσιο Δουλάμη για την παραχώρηση της θερμικής κάμερας από το Εργαστήριό τους στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επίσης, ευχαριστώ θερμά, τους Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη και Ξενοφών Φραντζή για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την συγγραφή του κειμένου, καθώς και το δυναμικό του Ο.Α.ΔΥ.Κ. και ιδιαίτερα τον γεωλόγο κ. Βασίλη Σιμιτζή για την άριστη συνεργασία μας κατά την διάρκεια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Η διεξαγωγή των μετρήσεων πεδίου δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την βοήθεια της Κωνσταντίνας Νανίδου και του Ορέστη Καραμάνου. Οι συμβολές του κ. Δημήτρη Στεφανάκη ήταν ιδιαίτερα χρήσιμες σε θέματα που αφορούσαν τον αυτόματο πιλότο (Ardupilot), ενώ ο κ. Κώστας Μακαντάσης παρείχε συμβουλές σε θέματα της θερμικής κάμερας. Προβλήματα σε θέματα ασύρματων δικτύων επιλύθηκαν με τη συμβολή του κ. Ιωάννη Αγαδάκου και συνάδελφων φοιτητών του τρίτου κύκλου υλοποίησης του φυτωρίου ιδεών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω τις ευχαριστίες στην οικογένειά μου και όλους τους φίλους μου για την βοήθεια και στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Χανιά, Μάρτιος 2014

Παναγιώτης Α. Ζερβός

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

Αλέξανδρο και Αργυρούλα,

Κώστα και Γιάννη

## Πίνακας Περιεχομένων


**Περίληψη** iii

**Περίληψη στα αγγλικά (Abstract)** v

**Πρόλογος** vii

**Κατάλογος Σχημάτων** xiv

**Κατάλογος Πινάκων** xvii

**Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή** ..... 1

1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο ..... 1

1.2 Σκοπός ..... 2

1.3 Στάδια υλοποίησης ..... 3

1.4 Σχέδιο ανάπτυξης ..... 4

**Κεφάλαιο 2: Φράγμα Αμαρίου** ..... 5

2.1 Ιστορική αναδρομή ..... 5

2.2 Σεισμικότητα Περιοχής ..... 6

2.3 Περιοχή ταμιευτήρα – Μορφολογία ..... 7

2.4 Γεωλογία ταμιευτήρα ..... 8

2.5 Τεκτονική ..... 9

2.6 Στεγανότητα ταμιευτήρα ..... 10

2.6.1 Στεγανότητα νότιας ουράς Κεφαλοβρυσσών ..... 10

2.6.2 Στεγανότητα ανατολικής ουράς Αποστολορέματος ..... 10

2.7 Τύπος φράγματος ..... 11

2.8 Συμπεράσματα ..... 12

**Κεφάλαιο 3: Τηλεπισκόπηση και θερμικές καταγραφές** ..... 14

3.1 Έννοια της Τηλεπισκόπησης ..... 14

3.2 Έννοια της αεροφωτογραφίας και διάκριση αισθητήρων Τηλεπισκόπησης ..... 15

3.3 Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ..... 16

3.4 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ακτινοβολίας ..... 17

3.5 Η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ..... 19

3.5.1 Θερμικές ιδιότητες υλικών ..... 20

3.5.2 Θερμικές υπέρυθρες εικόνες στο αντικείμενο του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων ..... 21

3.6 Βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας ..... 23

3.6.1 Μεταφορά με αγωγή ..... 23

3.6.2 Μεταφορά της θερμότητας με θερμική μεταβίβαση ..... 23

3.6.3 Μεταφορά με ακτινοβολία ..... 23

3.7 Η μέθοδος της θερμογραφίας ..... 24

3.7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμογραφία ..... 25
3.7.2 Πλεονεκτήματα και χρήσεις της μεθόδου ..... 25
3.8 Επεξεργασία και ερμηνεία θερμικών καταγραφών ..... 27
3.8.1 Ραδιομετρική διόρθωση ..... 27
3.8.2 Γεωμετρική διόρθωση - Γεωαναφορά εικόνων ..... 27
3.8.2.1 Γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα ..... 29
3.8.2.2 Εδαφικά σημεία ελέγχου - φωτοσταθερά ..... 29
3.8.3 Ερμηνεία θερμικών εικόνων ..... 29
3.9 Σχεδιασμός υπέρυθρων διασκοπήσεων ..... 30
3.10 Συμπεράσματα ..... 31
**Κεφάλαιο 4: Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV)** ..... 32
4.1 Ιστορική αναδρομή ..... 32
4.2 Πλεονεκτήματα των μη επανδρωμένων εναέριων μέσων ..... 34
4.2 Κατηγορίες μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων UAS ..... 34
4.2 Μη στρατιωτικές εφαρμογές UAV ..... 36
4.2.1 Μεταφορά αγαθών (Transport) ..... 36
4.2.2 Έρευνα και Διάσωση (Search and Rescue) ..... 37
4.2.3 Πυρανίχνευση (Fire Detection) ..... 37
4.2.4 Αρχαιολογία (Archaeology) ..... 37
4.2.5 Εφαρμογές Μηχανικού Ορυκτών Πόρων ..... 38
4.3 Νομοθεσία των UAV και των αερομοντέλων ..... 40
4.4 Έρευνα αγοράς έτοιμου συστήματος UAV ..... 41
4.4.1 Απαιτήσεις συστήματος UAV ..... 41
4.4.2 Διαθέσιμες επιλογές εμπορικών συστημάτων UAV ..... 42
4.4.3 Αξιολόγηση μη επανδρωμένων συστημάτων ..... 44
4.5 Συμπεράσματα ..... 45
**Κεφάλαιο 5: Κατασκευή μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV)** ..... 47
5.1 Κατασκευή πλατφόρμας ..... 47
5.1.1 Υλικά κατασκευής πλατφόρμας ..... 47
5.1.2 Συναρμολόγηση σκελετού ..... 48
5.1.3 Συναρμολόγηση συστήματος προσγείωσης ..... 50
5.1.4 Κατασκευή καλωδιώσεων – συνδέσεις ..... 51
5.1.5 Σύστημα καταγραφής ..... 55
5.1.6 Τελικό στάδιο – προγραμματισμός συστημάτων ..... 57
5.2 Περιγραφή πλατφόρμας UAV ..... 57
5.3 Περιγραφή συστήματος κάμερας ..... 60

5.4 Συμπεράσματα ..... 62
**Κεφάλαιο 6: Διεξαγωγή πτήσεων θερμικής καταγραφής** ..... 63
6.1 Προετοιμασία φωτοσταθερών ..... 63
6.2 Σταθμός βάσης ..... 64
6.3 Λίστα ελέγχου (checklists) ..... 65
6.4 Πρωινή θερμική καταγραφή ..... 67
6.5 Μεσημεριανή θερμική καταγραφή ..... 68
6.6 Σχέδιο πτήσης ..... 70
6.7 Συμπεράσματα ..... 72
**Κεφάλαιο 7: Επεξεργασία αποτελεσμάτων θερμικής καταγραφής** ..... 73
7.1 Δημιουργία μωσαϊκού ..... 73
7.1.1 Αλγόριθμος συνένωσης εικόνων του Microsoft ICE ..... 73
7.1.2 Συνένωση εικόνων ..... 74
7.2 Γεωμετρική διόρθωση μωσαϊκών ..... 78
7.3 Επεξεργασία των στοιχείων της πτήσης (Data Logs) του αυτομάτου πιλότου ..... 81
7.4 Συμπεράσματα ..... 82
**Κεφάλαιο 8: Ερμηνεία αποτελεσμάτων** ..... 83
8.1 Ερμηνεία μωσαϊκού πρωινής θερμικής καταγραφής ..... 83
8.2 Ερμηνεία μωσαϊκού μεσημεριανής θερμικής καταγραφής ..... 84
8.3 Σύγκριση θερμικής καταγραφής με οπτική παρατήρηση 16 ημέρες μετά ..... 86
8.4 Συμπεράσματα ..... 87
**Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Προτάσεις** ..... 88
**Βιβλιογραφία** ..... 90
**Παράρτημα** ..... 93

## Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Γεωαναφερμένος χάρτης της περιοχής, υποδεικνύοντας την περιοχή μελέτης στην νότια ουρά του φράγματος. ..... 3
2.1 Απεικόνιση της περιοχής του φράγματος Αμαρίου στην περιοχή του Ρεθύμνου. ..... 5
2.2 Απεικόνιση των ευρύτερων περιοχών του φράγματος. ..... 6
2.3 Σεισμοτεκτονικός χάρτης ευρύτερης περιοχής φράγματος Αμαρίου. ..... 7
2.4 Περιοχή ταμιευτήρα φράγματος Αμαρίου στο AutoCAD. ..... 8
2.5 Γεωλογική δομή της Κρήτης, μέσα στο τετράγωνο η ευρύτερη περιοχή Αμαρίου ..... 9
2.6 Φωτογραφία του φράγματος Αμαρίου από την ανατολική πλευρά. ..... 12
3.1 Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης στον χώρο. ..... 17
3.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. ..... 18
3.3 Η φασματική ζώνη του υπέρυθρου. ..... 20
3.4 Εντοπισμός αυξημένης θερμοκρασίας σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις. ..... 26
3.5 Εντοπισμός προβλημάτων μόνωσης και εισροής κρύου αέρα σε δάπεδο κτηρίου. ... 26
3.6 Έλεγχος σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. ..... 26
3.7 Ημερήσια θερμική διακύμανση του δολομίτη, του ασβεστόλιθου και του γρανίτη... 30
4.1 Παγκόσμια πρόβλεψη συνολικών δαπανών για την εξέλιξη των UAVs. ..... 34
4.2 Απεικόνιση της ονοματολογίας των UAVs σύμφωνα με το Αμερικάνικο Υπουργείο Εσωτερικής Ασφάλειας. ..... 36
4.3 Εικόνες αποτύπωσης ανθρώπων στο θερμικό υπέρυθρο. ..... 37
4.4 Το εξακόπτερο της Γερμανικής εταιρείας κατά την διάρκεια πτήσης σε υπαίθριο ορυχείο. ..... 39
4.5 Το εξακόπτερο της Γερμανικής εταιρείας κατά την πτήση επιθεώρησης σε φράγμα. 40
4.6 Εικόνα του αμερικάνικου μη επανδρωμένου αεροσκάφους. ..... 43
5.1 Ο σκελετός (frame) και τα ποδαράκια (landing gear) στις συσκευασίες τους. ..... 49
5.2 Η μεταλλική βάση ως οδηγός για την διάτρηση των άλλων δυο τρυπών. ..... 49
5.3 Οι έξι βραχίονες έτοιμοι για την μεταξύ τους συναρμολόγηση. ..... 50
5.4 Το εξακόπτερο μετά την συναρμολόγησή του. ..... 51
5.5 Απεικόνιση της συνδεσμολογίας όλων των εξαρτημάτων του UAV. ..... 52

5.6 Η βάση που κατασκευάστηκε για την πλακέτα ελέγχου και την μονάδα του GPS. ... 53
5.7 Τα καλώδια τροφοδοσίας του εξακόπτερου. ... 54
5.8 Η καλωδίωση του συστήματος καταγραφής. ... 54
5.9 Η βάση συναρμολογημένη με τους ειδικούς προσαρμογείς που κατασκευάστηκαν. 55
5.10 Εικόνα της βάσης με προσαρμοσμένη την κάμερα (δεξιά πλευρά). ... 56
5.11 Εικόνα της βάσης με προσαρμοσμένη την κάμερα (αριστερή πλευρά). ... 56
5.12 Ο αυτόματος πιλότος της πλατφόρμας. ... 58
5.13 Το εξακόπτερο τελειοποιημένο έτοιμο για πτήση (πάνω: πίσω πλευρά, κάτω: μπροστινή πλευρά). ... 59
5.14 Το σύστημα της κάμερας σε πλήρη λειτουργική κατάσταση (πίσω μέρος)... ... 60
5.15 Η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την θερμική καταγραφή. ... 62
6.1 Η διαδικασία λήψης μετρήσεων (α) ταχύτητας ανέμου, (β) θερμοκρασία εδάφους, και (γ) θερμοκρασία νερού στο πεδίο. ... 63
6.2 Διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της παραμονής στο πεδίο. ... 64
6.3 Εικόνα που απεικονίζει τον σταθμό βάσης που στήθηκε στο πεδίο. ... 65
6.4 Εικόνα που απεικονίζει το εξακόπτερο και τον εξοπλισμό του στο πεδίο κατά την διάρκεια της αναμονής για την δεύτερη πτήση. ... 67
6.5 Εικόνα κατά την διάρκεια απογείωσης μέσω χειριστηρίου τηλεκατεύθυνσης για την δεύτερη πτήση. ... 68
6.6 Μέτρηση των φωτοσταθερών με ολικό γεωδαιτικό σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης... ... 69
6.7 Εικόνα των αυτοσχέδιων φωτοσταθερών (πυρσοί πετρελαίου). ... 69
6.8 Εικόνα με τοποθετημένους και αναμμένους τους πυρσούς μέσα στον οριοθετημένο κάνναβο. ... 70
6.9 Εικόνα του λογισμικού του αυτομάτου πιλότου, διακρίνεται το σχέδιο πτήσης που δημιουργήθηκε (κίτρινες γραμμές), στον οριοθετημένο κάνναβο της περιοχής μελέτης (κόκκινο πλαίσιο). ... 71
6.10 Εικόνα που φαίνονται οι εικόνες που θα ληφθούν διακρίνοντας την πλάγια επικάλυψη στην περιοχή μελέτης (Footprint). ... 71
7.1 Μερικές ενδεικτικές εικόνες της θερμικής καταγραφής (Πάνω: πρωινή καταγραφή, Κάτω: αντίστοιχες εικόνες στην μεσημεριανή θερμική καταγραφή). ... 74
7.2 Εικόνα του μωσαϊκού κατά την πρωινή θερμική καταγραφή. ... 75
7.3 Εικόνα του μωσαϊκού κατά την μεσημεριανή θερμική καταγραφή. ... 76
7.4 Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα. ... 77
7.5 Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα ληφθείσα από το αριστερό πρανές, υποδεικνύοντας την μη φυσιολογική εισροή. ... 78

7.6 Η θέση των φωτοσταθερών στο χώρο σε σχέδιο AutoCad ..... 79
7.7 Τα δύο μωσαϊκά μετά την γεωμετρική διόρθωση σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων..... 80
7.8 Το ίχνος της πορείας από το GPS του αυτομάτου πιλότου κατά την πρωινή πτήση σε χάρτη Google Earth, περιοχή συνολικά 1.200 $m^2$..... 81
7.9 Το ίχνος της πορείας από το GPS του αυτομάτου πιλότου κατά την μεσημεριανή πτήση σε χάρτη Google Earth, μπορεί να διακριθεί η απόκλιση του ίχνους σε μερικά σημεία λόγω αύξησης της ταχύτητας του ανέμου..... 82
8.1 Απεικόνιση της ερμηνείας στο μωσαϊκό της πρωϊνής καταγραφής. ..... 83
8.2 Σύγκριση των μωσαϊκών της πρωϊνής και της μεσημεριανής θερμικής καταγραφής. 85
8.3 Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα 16 μέρες μετά την θερμική καταγραφή, με σκοπό την αποτύπωση διαφορών..... 87
9.1 Αναμνηστική φωτογραφία μετά το πέρας της διεξαγωγής των μετρήσεων στην ουρά του φράγματος Αμαρίου. ..... 89

## Κατάλογος Πινάκων

3.1 Οι φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος του Ήλιου. ..... 18
3.2 Μερικές τυπικές τιμές υλικών στους 20$^{o}$ C. ..... 22
4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του γερμανικού προϊόντος. ..... 38
4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αμερικάνικου προϊόντος. ..... 42
4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξακοπτέρου της δεύτερης επιλογής. ..... 43
4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξακοπτέρου της τρίτης επιλογής. ..... 44
5.1 Ποσότητα και περιγραφή κάθε υλικού του εξακόπτερου. ..... 48
5.2 Εξοπλισμός που απαιτήθηκε για την θερμική καταγραφή. ..... 48
5.3 Πίνακας με τα χαρακτηριστικά της θερμικής κάμερας. ..... 61
6.1 Λίστα ελέγχου (Checklist). ..... 66
7.1 Πίνακας με την ακριβή θέση των φωτοσταθερών σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων. ..... 79
8.1 Πίνακας με τις μετρούμενες θερμοκρασίες της πρωινής θερμικής καταγραφής. ..... 83
8.2 Πίνακας με τις μετρούμενες θερμοκρασίες της μεσημεριανής θερμικής καταγραφής. ..... 84

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την επίδειξη των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) σε εφαρμογές Μηχανικού Ορυκτών Πόρων. Πρωταρχικός στόχος, ήταν η κατασκευή πρωτότυπου UAV, το οποίο χαρακτηρίζεται από το χαμηλό του κόστος, την δυνατότητα να φέρει αισθητήρες συγκεκριμένης μάζας και συγκεκριμένη αυτονομία. Για την επίδειξη των δυνατοτήτων του UAV, χρησιμοποιήθηκε θερμική κάμερα, με στόχο την εφαρμογή της τεχνικής της θερμογραφίας, που είχε ως αποτέλεσμα την ανίχνευση μη χαρτογραφημένων εισροών ύδατος, στην λεκάνη του φράγματος «Ποταμών» στο Αμάρι, Ρεθύμνου, Κρήτης και τον εντοπισμό πιθανής ρύπανσης στην υπο-περιοχή ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας όσον αφορά τα θερμογραφήματα αποτελούν σημαντικά στοιχεία για τον διαχειριστή του φράγματος, τον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης[1] (Ο.Α.Κ.). Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εφαλτήριο για την εκπόνηση διάφορων μελετών, υπέρ της προστασίας και ανάδειξης του σημαντικού αυτού τεχνικού έργου, αλλά και υδροβιότοπου της Κρήτης. Όσον αφορά το μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα, μπορεί να αποτελέσει σημείο αναφοράς για μελλοντικές εργασίες πάνω στο αντικείμενο αλλά και για την περαιτέρω εξέλιξη του κλάδου των μη επανδρωμένων στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

## 1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο

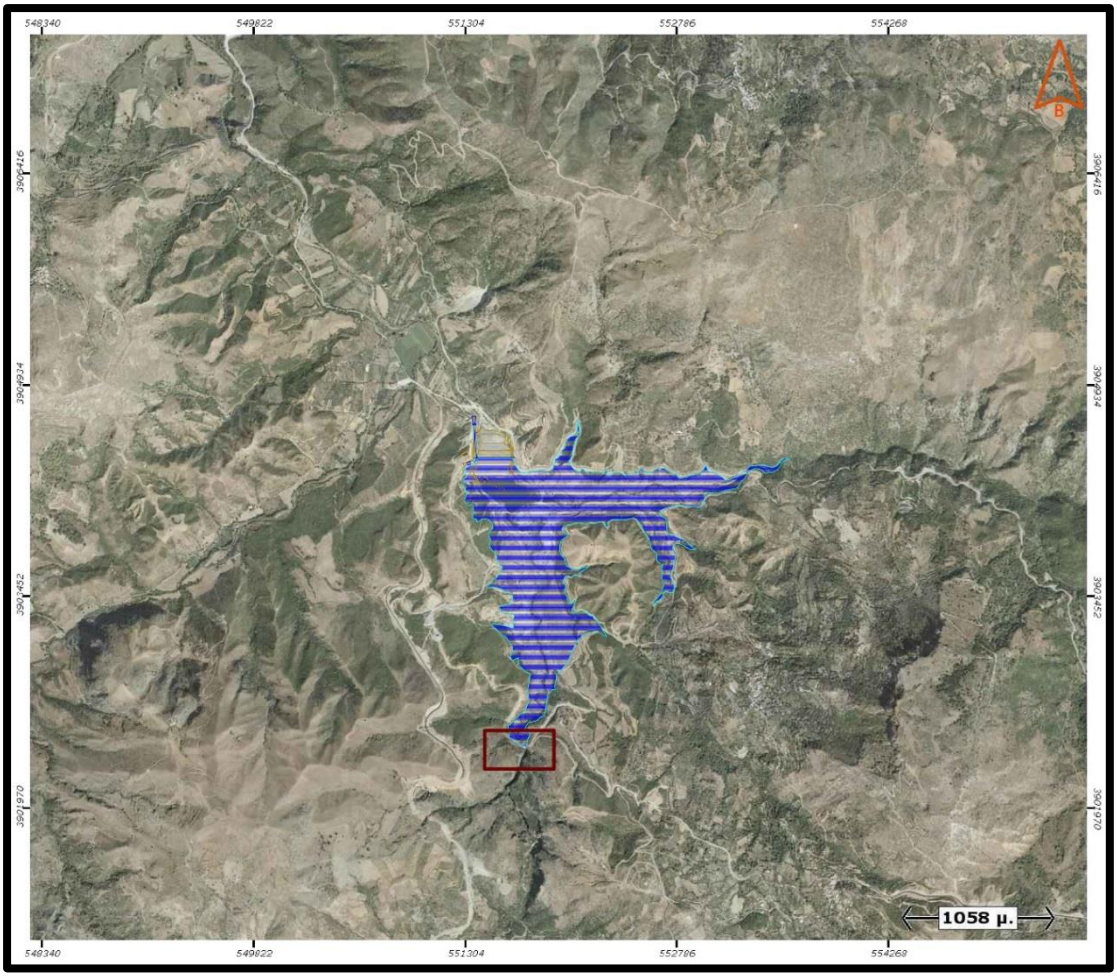
Τα τελευταία χρόνια, τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAVs) χρησιμοποιούνται διεθνώς σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές καθώς αποδεικνύονται εξίσου αξιόπιστα με τα συμβατικά επανδρωμένα ιπτάμενα μέσα και τις περισσότερες φορές καλύτερης ακρίβειας από δορυφορικά μέσα. Η παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά θα παρουσιάσει την κατασκευή ενός πρότυπου UAV, το οποίο διακρίνεται από το χαμηλό του κόστος και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, θα εφαρμόσει τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας με σκοπό την χαρτογράφηση επιφανειακών εισροών ύδατος στον ταμιευτήρα του φράγματος Αμαρίου, στον οποίο έχουν σχηματιστεί, λόγω του αναγλύφου, δυο «ουρές» (άκρα): η ανατολική και η νότια (Σχήμα 1.1). Στην ανατολική «ουρά» έχουν παρατηρηθεί από τον Ο.Α.Κ. διαρροές ύδατος, λόγω καρστικοποιημένων ασβεστολίθων που υπάρχουν στο υπέδαφος. Η νότια αποτελεί την κύρια τροφοδοσία του ταμιευτήρα με νερό που προέρχεται από το φαράγγι του «Αγίου Αντωνίου» και την αναβάλουσα πηγή: «Κεφαλοβρύσσα». Αρχικό κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των διαρροών της ανατολικής ουράς, ωστόσο, η μείωση της στάθμης της λίμνης του ταμιευτήρα κατά την καλοκαιρινή περίοδο οδήγησε στον επαναπροσδιορισμό της έρευνας, η οποία τελικά

[1] Πρώην Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης (Ο.Α.ΔΥ.Κ)

επικεντρώθηκε στην χαρτογράφηση και μελέτη της νότιας ουράς που αποτελεί την κύρια τροφοδοσία του ταμιευτήρα.

## 1.2 Σκοπός

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι να καταδείξει τις προοπτικές που έχει ο κλάδος των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων σε εφαρμογές Μηχανικού Ορυκτών Πόρων. Ως πειραματική εφαρμογή επελέγη η τεχνική της θερμικής χαρτογράφησης μέσω πρωτότυπου UAV που κατασκευάστηκε στα πλαίσια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας. Μέσω της θερμικής χαρτογράφησης γίνεται προσπάθεια ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού εισροών ύδατος κατά την καλοκαιρινή περίοδο σε έκταση επιφάνειας 1.200 $m^2$ στην όχθη της νότιας ουράς του ταμιευτήρα (Σχήμα 1.1). Αξίζει να σημειωθεί πως από το 2009 που τέθηκε σε λειτουργία το φράγμα Αμαρίου δεν έχει γίνει κάποια αντίστοιχη μελέτη για την περιοχή αυτή. Το θέμα αυτό αποτελεί καινοτομία τόσο για τον κλάδο των UAVs όσο και για τη σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, καθώς στο παρελθόν δεν έχει γίνει προσπάθεια αντίστοιχης εναέριας θερμογραφίας, με χρήση παρόμοιας πρότυπης κατασκευής πλατφόρμα.




Σχήμα 1.1: Γεωαναφερμένος χάρτης της περιοχής, υποδεικνύοντας την περιοχή μελέτης στην νότια ουρά του φράγματος (Πηγή: Εθνικό Κτηματολόγιο, 2014).

## 1.3 Στάδια υλοποίησης

Αρχικό στάδιο της παρούσας εργασίας αποτελεί η συλλογή πληροφοριών από τεχνικές εκθέσεις, αρχεία του Ο.ΑΔΥ.Κ καθώς και άλλα συγγράμματα ελληνικής και διεθνής βιβλιογραφίας πάνω στο αντικείμενο. Έπειτα ακολουθεί το κατασκευαστικό κομμάτι της εργασίας, το οποίο ήταν και το πιο χρονοβόρο, λόγω του ότι χρειάστηκαν πολυάριθμες δοκιμές και ρυθμίσεις, τόσο στατικές όσο και πτητικές, για να επιτευχθεί η τελική διαμόρφωση του οχήματος στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής σειρά είχε η περιχάραξη της περιοχής μελέτης, η οποία έγινε στο πεδίο μερικές μέρες πριν την διεξαγωγή της πτήσης. Έτσι, μέσω της αναγνώρισης πεδίου οριοθετήθηκε η περιοχή που εμφάνιζε το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη θερμική καταγραφή. Στη συνέχεια οργανώθηκε και πραγματοποιήθηκε η διεξαγωγή των μετρήσεων (πτήσεων) στην επιθυμητή περιοχή μελέτης. Το επόμενο στάδιο αποτελείται από επεξεργασία των δεδομένων στον υπολογιστή, χρησιμοποιώντας τόσο τον ιδιωτικό όσο και τον υπολογιστή του Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, στοχεύοντας στην δημιουργία μωσαϊκού και τη

γεωμετρική διόρθωσή του σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Τέλος, από την ερμηνεία των μωσαϊκών αντλήθηκαν πληροφορίες για την ποιότητα των υδάτων που εισρέουν επιφανειακά στην λίμνη από την συγκεκριμένη τροφοδοσία.

## 1.4 Σχέδιο ανάπτυξης

Στο επόμενο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα αναλυθούν τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία του φράγματος Αμαρίου, όπως αυτά αντλήθηκαν από το αρχείο του Ο.Α.ΔΥ.Κ. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της Τηλεπισκόπησης, του θερμικού φάσματος και της μεθόδου της θερμογραφίας, λαμβάνοντας υπ' όψιν ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται εισαγωγή στα μη επανδρωμένα ιπτάμενα μέσα, έρευνα αγοράς τέτοιων οχημάτων καθώς και η υφιστάμενη νομοθεσία πάνω στο αντικείμενο.

Οι βασικές τεχνικές λεπτομέρειες της κατασκευής του μη επανδρωμένου ιπτάμενου μέσου καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και επιλύθηκαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5. Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία πραγματοποίησης των μετρήσεων πεδίου με όλες τις λεπτομέρειες που έπαιξαν ρόλο στην επιτυχή διεκπεραίωση των πτήσεων καθώς και πλούσιο φωτογραφικό υλικό για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας. Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει την επεξεργασία των θερμικών εικόνων, οι οποίες παρουσιάζονται ως «μωσαϊκά». Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 δίδονται, τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και την ερμηνεία των μωσαϊκών. Επίσης, δίνονται προτάσεις αναφορικά με την περαιτέρω εφαρμογή UAV τόσο στο φράγμα Αμαρίου όσο και σε άλλες εφαρμογές του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων σε συνεργασία με τον Οργανισμό Ανάπτυξης Κρήτης.

# Κεφάλαιο 2: Φράγμα Αμαρίου

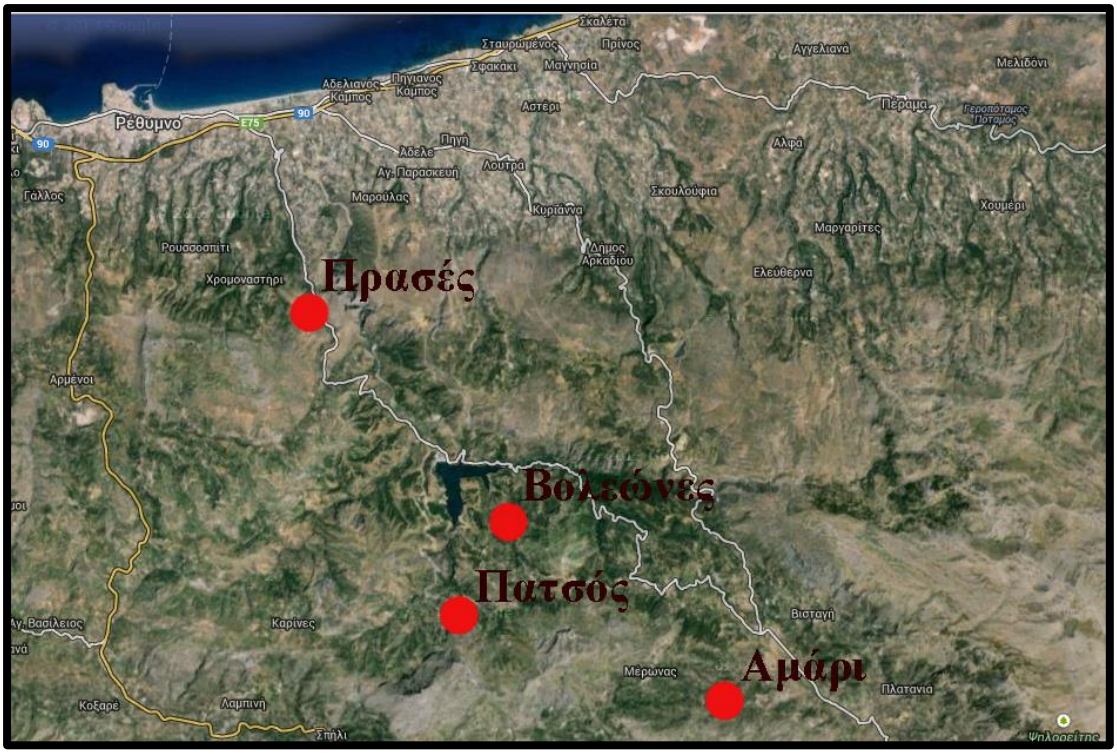
Το φράγμα Αμαρίου «Ποταμών» πήρε το όνομα από το ομώνυμο χωριό και βρίσκεται 25 km νοτιοανατολικά της πόλης του Ρεθύμνου (Σχήμα 2.1). Η λίμνη που σχηματίζεται από το φράγμα βρίσκεται μέσα στην κοιλάδα του Αμαρίου, έχει χωρητικότητα $22,5*10^6\ m^3$ και είναι ένας σπουδαίος υδροβιότοπος της νοτιοανατολικής λεκάνης της Μεσογείου.




Σχήμα 2.1: Απεικόνιση της περιοχής του φράγματος Αμαρίου στην περιοχή του Ρεθύμνου (Πηγή: Google Maps, 2014).

## 2.1 Ιστορική αναδρομή

Σύμφωνα με την μελέτη του Ο.Α.ΔΥ.Κ, (1990) οι πρώτες σκέψεις για την κατασκευή φράγματος στους «Ποταμούς» Αμαρίου έγιναν από το Υπουργείο Γεωργίας που το είχε ονομάσει «φράγμα Πρασών» από το ομώνυμο χωριό «Πρασές» (Σχήμα 2.2). Την περίοδο 1965 – 1967 εκτελέστηκαν ερευνητικές γεωτρήσεις πρώτα σε στένωμα περίπου 2 km κατάντη της σημερινής θέσης και στη συνέχεια στη σημερινή θέση. Έκτοτε εγκαταστάθηκε βροχομετρικός σταθμός στο χωριό «Βολεώνες», το οποίο βρίσκεται μέσα στη λεκάνη απορροής, ενώ εκτελούνται σε σχεδόν μηνιαία βάση μετρήσεις της παροχής του ποταμού σε σημείο αμέσως ανάντη της σημερινής θέσης του φράγματος.

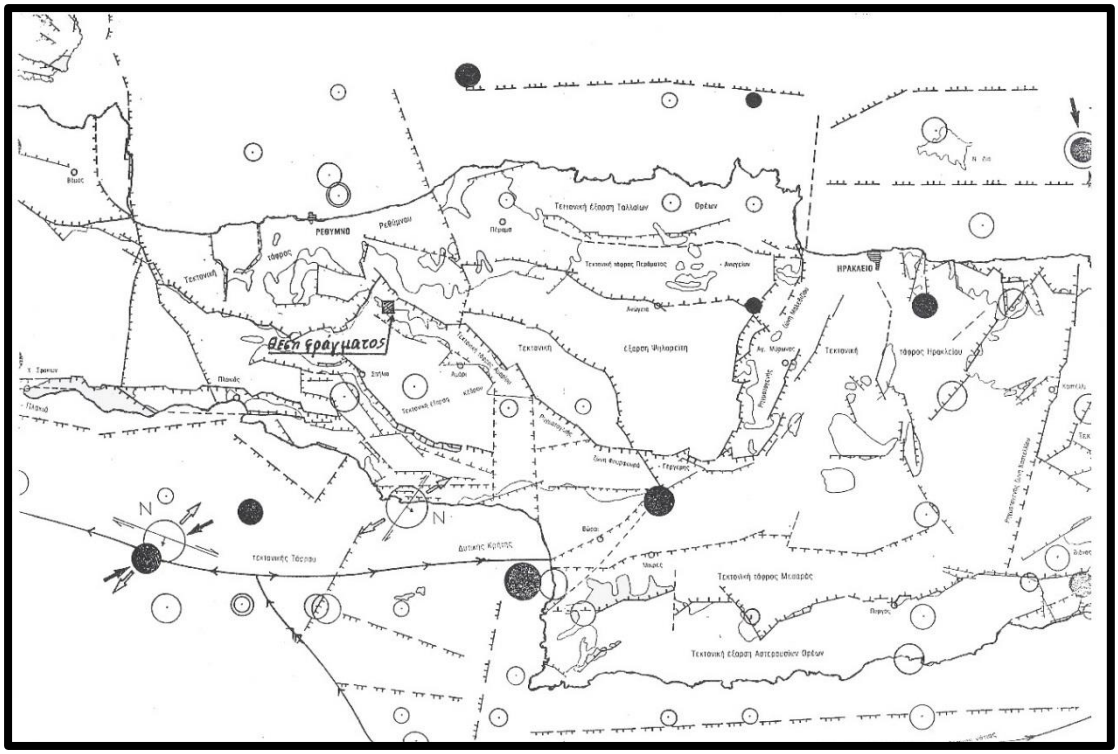



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των ευρύτερων περιοχών του φράγματος (Πηγή: Google Maps, 2014).

Στη συνέχεια, ο Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης (Ο.Α.ΔΥ.Κ.) προώθησε την ανάθεση και εκπόνηση της «Προμελέτης και Οριστικής Μελέτης» του φράγματος «Ποταμών, Αμαρίου, Ρεθύμνης». Το συγκεκριμένο έργο συγκεντρώνει χειμερινά και εαρινά νερά, που μέχρι πριν κατέληγαν ανεκμετάλλευτα στη θάλασσα, σε ταμιευτήρα χωρητικότητας $22,5*10^6$ $m^3$ περίπου, με σκοπό την άρδευση του κάμπου Ρεθύμνης, έκτασης τριάντα δυο χιλιάδων (32.000) στρεμμάτων.

## 2.2 Σεισμικότητα Περιοχής

Η Κρήτη βρίσκεται πάνω στην καμπή του «Ελληνικού Τόξου», στην εξωτερική πλευρά του οποίου (νοτίως της Κρήτης) εκτείνεται η «Ελληνική Τάφρος», που αποτελεί το μέτωπο σύγκρουσης της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον έντονο τεκτονικό τεμαχισμό του νησιού με μεγάλα ρήγματα και την ισχυρή σεισμική δραστηριότητα κατά κύριο λόγο στην θαλάσσια περιοχή και κατά δεύτερον στο ίδιο το νησί. Τα περισσότερα και σημαντικότερα επίκεντρα βρίσκονται κατά μήκος των θαλάσσιων τεκτονικών τάφρων στο νότο (μεταξύ Κρήτης και νήσου Γαύδου) και στη δύση (δυτικότερα των Χανίων). Οι εστίες πάνω στο νησί είναι σχετικά ολιγάριθμες με τους μεγαλύτερους σεισμούς να έχουν πραγματοποιηθεί στις τεκτονικές τάφρους της Μεσσαράς, Ηρακλείου και Ιεράπετρας (Σχήμα 2.3) (Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

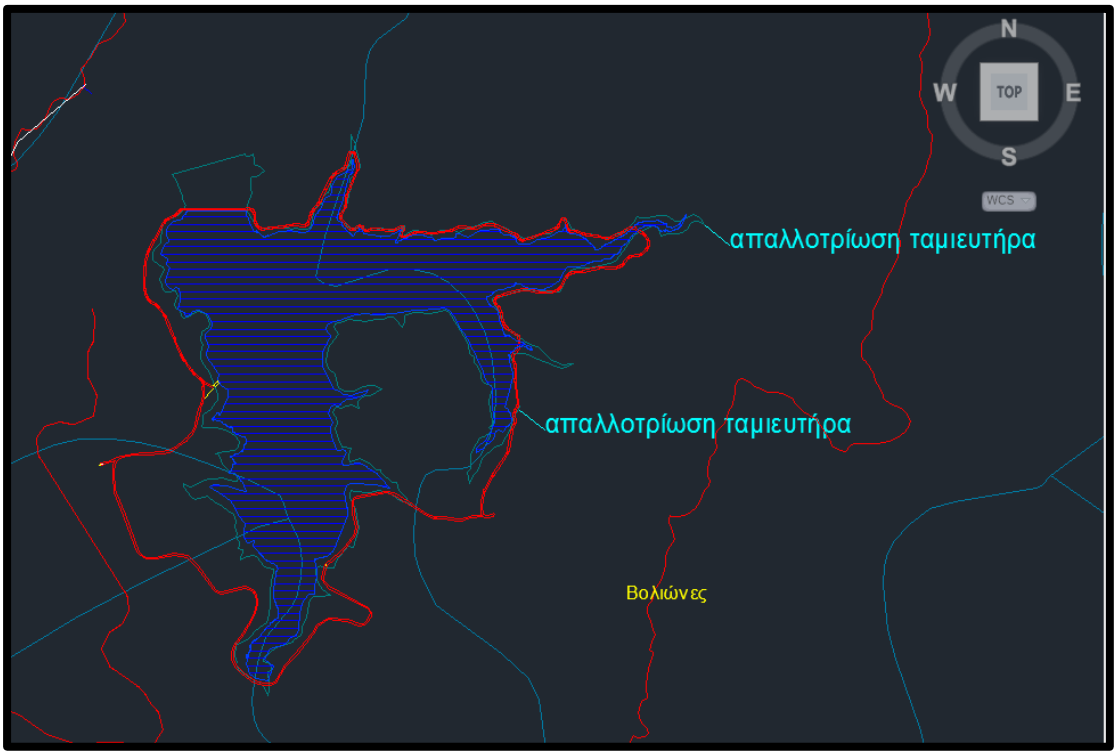



Σχήμα 2.3: Σεισμοτεκτονικός χάρτης ευρύτερης περιοχής φράγματος Αμαρίου (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

## 2.3 Περιοχή ταμιευτήρα – Μορφολογία

Η περιοχή του ταμιευτήρα είναι λοφώδης έως ορεινή και γενικά έχει έντονες κλίσεις φυσικών πρανών. Η κοιλάδα του ταμιευτήρα αποτελείται από δύο κυρίως κλάδους, τον νότιο στη ρεματιά των «Κεφαλοβρυσσών» και τον ανατολικό στην κυρίως ρεματιά της λεκάνης «Αποστολόρεμα». Οι δυο αυτοί κλάδοι ενώνονται περίπου, 500 m ανάντη του άξονα του φράγματος με αποτέλεσμα να σχηματίζεται μια ενιαία κοιλάδα (Σχήμα 2.4). Η κοιλάδα στην περιοχή του ταμιευτήρα είναι σχετικά ανοιχτή, πράγμα που οφείλεται αφενός στην σχετική ευαισθησία των γεωλογικών σχηματισμών (Νεογενές) στους παράγοντες της αποσάθρωσης και της διάβρωσης και αφετέρου στο γεγονός ότι προ της διάνοιξης του φαραγγιού στις Πρασές (Σφακορύακο) η περιοχή αποτέλεσε μάλλον για μικρή χρονική περίοδο σχεδόν κλειστή λεκάνη που αποστραγγίστηκε με την διαβρωσιγενή διάνοιξη του φαραγγιού. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η σχετικά μικρή κατά μήκος κλίση των κυρίως ρεμάτων. Η μικρή αυτή κλίση συνεπάγεται και μικρή μεταφορική ικανότητα των νερών με φερτές ύλες (συρόμενες). Η εγκάρσια κλίση των φυσικών πρανών αντικατοπτρίζει τον βαθμό ανθεκτικότητας των πετρωμάτων στην αποσάθρωση – διάβρωση. Έτσι, οι ασβεστόλιθοι δίνουν σχεδόν κατακόρυφα πρανή, οι φυλλίτες – χαλαζίτες ελαφρώς ηπιότερα και τα κροκαλοπαγή του Μειόκαινου επίσης απότομα πρανή. Πολύ ηπιότερα πρανή δίδουν οι μάργες του Μειόκαινου.

Στη ρεματιά προς το χωριό «Βολεώνες» στην ανατολική όχθη, που αποτελείται από κροκαλοπαγή του Νεογενούς, υπάρχουν παλιές επιφανειακές καταπτώσεις που οφείλονται στην υποσκαφή του πρανούς από τα ρέοντα νερά της ρεματιάς σε παλιότερη περισσότερο υγρή εποχή. Γενικά η λεκάνη του ταμιευτήρα είναι αποτέλεσμα καθαρά μορφογενετικών (διαβρωσιγενών) διεργασιών και όχι τεκτονικών (Ο.Α.ΔΥ.Κ., 1990).

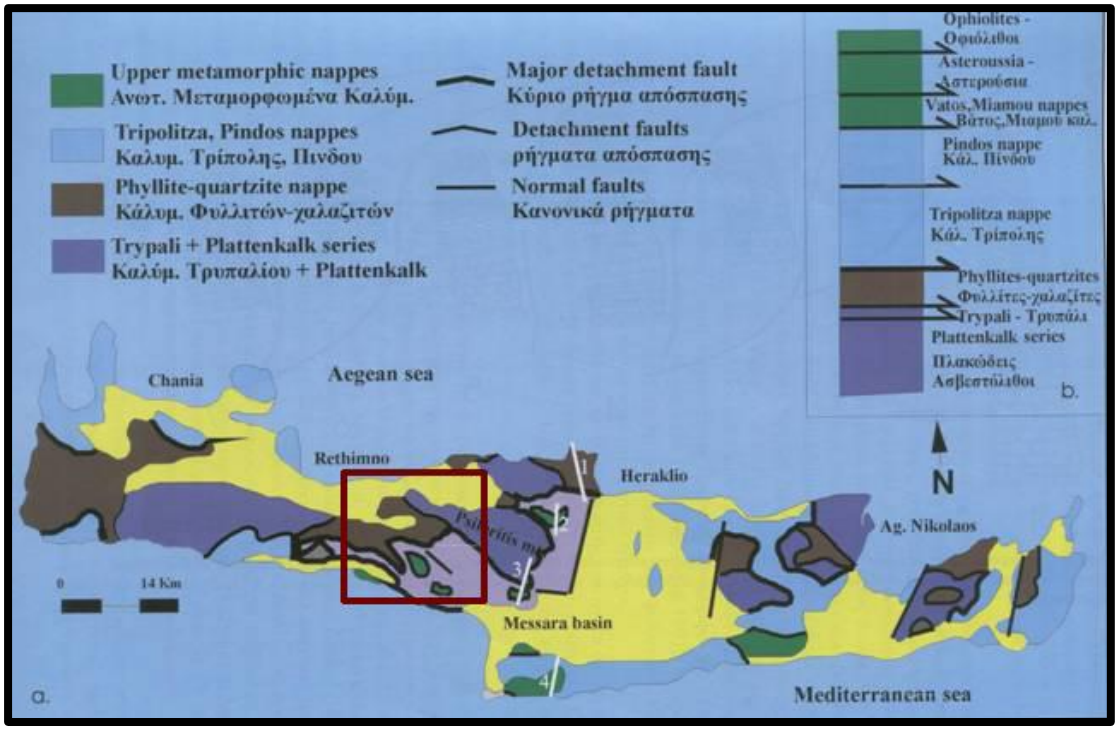



Σχήμα 2.4: Περιοχή ταμιευτήρα φράγματος Αμαρίου στο AutoCAD (Πηγή: Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

## 2.4 Γεωλογία ταμιευτήρα

Ο ταμιευτήρας στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από αδρομερή μετρίως συγκολλημένα κροκαλοπαγή του Μειόκαινου και σε μικρότερο από φυλλίτες – χαλαζίτες του Παλαιοζωικού (βλ. χάρτη γεωλογικών τομών παραρτήματος). Στα δύο άκρα (νότια και ανατολική ουρά) του ταμιευτήρα εμφανίζονται και μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι, οι οποίοι μάλιστα στην περίπτωση του «Αποστολορέματος» δημιουργούν και κινδύνους διαφυγών. Τοπικά πάνω στα κροκαλοπαγή παρατηρούνται λεπτοστρωματώδεις ψαμμιτικοί ασβεστόλιθοι μικρού πάχους (1 – 2 m), που αποτελούν ένα είδος επίπαγου. Στα χαμηλά τμήματα της μικρής κοιλάδας του ρέματος Κεφαλοβρύσσα κάτω από τα κροκαλοπαγή επικρατούν αργιλικές μάργες και ιλυόλιθοι χρώματος τεφροκύανου, στις οποίες παρεμβάλλονται και λεπτές ενστρώσεις λιγνίτη. Στη κοίτη των χειμάρρων επικρατούν αδρομερείς αποθέσεις κροκάλων χαλικιών και άμμου, πάχους έως 12 m περίπου. Οι κροκάλες είναι ως επί το πλείστον γνευσιακές, χαλαζιτικές και προέρχονται από τη διάβρωση όχι μόνο της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς αλλά και των χαλαρών

κροκαλοπαγών του Νεογενούς (Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990). Στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί απεικονίζεται η γεωλογική δομή της Κρήτης και σε τετράγωνο πλαίσιο η ευρύτερη περιοχή του φράγματος.




Σχήμα 2.5: Γεωλογική δομή της Κρήτης, μέσα στο τετράγωνο η ευρύτερη περιοχή Αμαρίου (Πηγή: ΙΜΣ-ΙΤΕ, 2013).

## 2.5 Τεκτονική

Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση του Ο.Α.ΔΥ.Κ, (1990) η διεύθυνση της σχιστότητας της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς είναι γενικά Β-Ν έως ΒΑ-ΝΔ και η κλίση της γενικά ανατολική με γωνία 25$^{o}$ – 35$^{o}$. Οι φυλλίτες - χαλαζίτες τέμνονται από δύο συστήματα διακλάσεων , από τα οποία το πρώτο έχει διεύθυνση Β-Ν και κλίση 66$^{o}$ προς Α και το δεύτερο έχει διεύθυνση Α-Δ και κλίση 74$^{o}$ προς Β. Η σχιστότητα γενικά συμπίπτει με την αρχική στρώση των πετρωμάτων, τα οποία προτού υποστούν τη μεταμόρφωση αποτελούσαν ιζήματα και συγκεκριμένα αργιλικούς σχιστόλιθους, μάργες και ψαμμίτες. Με τη μεταμόρφωση οι ψαμμίτες μεταμορφώθηκαν σε χαλαζίτες και οι αργιλικοί σχιστόλιθοι και οι μάργες σε φυλλίτες. Σύνηθες φαινόμενο αποτελεί η ύπαρξη μικροπτυχών, στολιδώσεων και μικροεφιππεύσεων, κυρίως στην επαφή των άκαμπτων στρωμάτων (χαλαζίτες) με τα εύκαμπτα (φυλλίτες και κυρίως γραφιτικοί σχιστόλιθοι). Στις ζώνες αυτές το πέτρωμα γενικά είναι τεκτονικά καταπονημένο και διατμημένο και συνήθως μυλωνιτιωμένο σε πάχος 2 – 10 cm. Τέτοιου είδους ευαίσθητες ζώνες, πάντως συνήθως δεν έχουν μεγάλη ανάπτυξη, όχι μόνο σε πάχος αλλά ούτε και σε μήκος. Ζώνες γραφιτικών σχιστόλιθων έντονα εξαλλοιωμένων και

μυλωνιτιωμένων μπορεί να φθάσουν τοπικά και το πάχος των 2 – 3 m. Τα στρώματα των νεογενών βρίσκονται σχεδόν σε οριζόντια θέση.

## 2.6 Στεγανότητα ταμιευτήρα

Ο σχηματισμός των φυλλιτών – χαλαζιτών, που αποτελεί το υπόβαθρο του ταμιευτήρα, είναι γενικά στεγανός. Τοπικά όμως και ανάλογα με τον βαθμό κερματισμού και χαλάρωσης είναι δυνατή η κυκλοφορία νερού μικρής ποσότητας. Αυτό είναι δυνατό κυρίως στην επιφανειακή κερματισμένη ζώνη πάχους 10 – 15 m (βλ. χάρτη γεωλογικών τομών παραρτήματος). Πραγματοποιήθηκαν από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ γεωτρήσεις για τον προσδιορισμό της στεγανότητας σε όλη την περιοχή του ταμιευτήρα, όμως στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσει η στεγανότητα κατά κύριο λόγο στα δυο άκρα του (ουρές). Οι ασβεστόλιθοι που εμφανίζονται στις ουρές των δύο κλάδων του ταμιευτήρα (νότια και ανατολική) είναι σε μεγάλο βαθμό υδροπερατοί λόγω κερματισμού και αποκαρστίωσης (Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

### 2.6.1 Στεγανότητα νότιας ουράς Κεφαλοβρυσσών

Οι ασβεστόλιθοι του φαραγγιού «Κεφαλοβρύσσα» (βλ. γεωλογική τομή Η-Η χάρτη παραρτήματος) παρά την υδροπερατότητά τους, δεν δημιουργούν πρόβλημα στεγανότητας, γιατί από κάτω τους υπάρχουν αδιαπέρατοι αργιλικοί σχιστόλιθοι που κλίνουν προς τον ταμιευτήρα κι έτσι αναγκάζουν τα διηθούμενα σε αυτούς νερά να ρέουν υπογείως προς τον ταμιευτήρα και τέλος να εκδηλώνονται υπό μορφή πηγών (πηγή «Κεφαλοβρύσσα»). Η κατάσταση αυτή δεν πρόκειται να μεταβληθεί ακόμη και αν η ανώτατη στάθμη του ταμιευτήρα ανέβει πολύ ψηλότερα από την προβλεπόμενη των 200 m περίπου. Οι αδιαπέρατοι αργιλικοί σχιστόλιθοι κάτω από τους ασβεστόλιθους εμφανίζονται στην κοίτη σε μεγάλο μήκος από την είσοδο του φαραγγιού («Άγιος Αντώνιος») και δεν επιτρέπουν τις διαφυγές έξω από την λεκάνη του φράγματος (Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

### 2.6.2 Στεγανότητα ανατολικής ουράς Αποστολορέματος

Οι ασβεστόλιθοι στο κυρίως ρέμα («Αποστολόρεμα») καλύπτονται σε μικρό τμήμα από τα νερά του μελλοντικού ταμιευτήρα, πίσω από τον οποίο, όμως επανεμφανίζονται στην κοίτη οι στεγανοί φυλλίτες (βλ. χάρτη γεωλογικών τομών παραρτήματος). Επίσης εκτελέστηκε από τον Ο.Α.ΔΥ.Κ και η γεώτρηση Β-7[2], η οποία είχε βάθος 50 m με σκοπό να εξεταστεί εάν σε μικρό βάθος κάτω από τους ασβεστόλιθους υπάρχουν φυλλίτες και σε ποιο βάθος βρίσκεται η στάθμη των υπογείων υδάτων. Το αποτέλεσμα της γεώτρησης αυτής ήταν η διάτρηση μόνο έντονα καρστικών ασβεστολίθων και δολομιτών μαύρου χρώματος. Δεν συναντήθηκε στάθμη

[2] Οι αναφερόμενες εκτελεσθείσες ερευνητικές γεωτρήσεις Β-1 έως Β-7 φαίνονται στον χάρτη γεωλογικών τομών του παραρτήματος

υπογείων υδάτων, αλλά ούτε και φυλλίτες παρόλο που έφτασε 35 m κάτω από την κοίτη του ρέματος.

Επίσης, τον Ιανουάριο του 1990 παρατηρήθηκε ότι η μικρή έστω ροή των νερών της κοίτης σχεδόν εξαφανίζονταν στο τμήμα αυτό των ασβεστόλιθων, πράγμα που συνεπάγεται όχι μόνο μεγάλη περατότητα, αλλά κυρίως διηθήσεις και διαφυγές εκτός ταμιευτήρα. Γι' αυτό θα πρέπει τα νερά του ταμιευτήρα να μην καλύπτουν τους ασβεστόλιθους αυτούς, εκτός κι αν στεγανοποιηθούν επιφανειακά, η εκτός αν θεωρηθεί δεδομένο ότι ένα μέρος των νερών πάνω από το υψόμετρο των 195 m διαφεύγει. Πάντως, βέβαιο είναι ότι εάν η ανώτατη στάθμη δεν υπερβαίνει το υψόμετρο των 195 m περίπου δεν θα υπάρχει πρόβλημα, γιατί μέχρι το υψόμετρο αυτό επικρατούν οι στεγανοί φυλλίτες (Ο.Α.ΔΥ.Κ, 1990).

## 2.7 Τύπος φράγματος

Η μεγάλη ανομοιογένεια των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που δομούν το έδαφος έδρασης του φράγματος (σκληροί άκαμπτοι χαλαζίτες με μαλακότερους εύκαμπτους σχιστοφυείς φυλλίτες και τοπικά μαλακούς γραφιτικούς σχιστόλιθους), η ύπαρξη έντονα κερματισμένων έως και μυλωνιτιωμένων ζωνών λόγω μεγάλης τεκτονικής καταπόνησης, η διάρρηξη του πετρώματος και τέλος, η δυνατότητα χρησιμοποίησης των υλικών εκσκαφής των αντερεισμάτων συνηγόρησαν στην επιλογή του χωμάτινου φράγματος με αδιαπέρατο πυρήνα από αργιλικά υλικά, το οποίο έχει λιθορριφθεί (εξωτερικά) ανάντη και κατάντη. Υπέρ του χωμάτινου φράγματος συνηγορεί και η σεισμικότητα της περιοχής. Ακολουθεί φωτογραφία του φράγματος από την ανατολική πλευρά του (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6: Φωτογραφία του φράγματος Αμαρίου από την ανατολική πλευρά.

## 2.8 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, στο Κεφάλαιο αυτό αναφέρθηκαν τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής του φράγματος Αμαρίου. Αναλύθηκαν στοιχεία της γεωλογικής δομής και της μορφολογίας της περιοχής καθώς και η στεγανότητα του ταμιευτήρα. Προκύπτει λοιπόν πως πρόβλημα στεγανότητας στον ταμιευτήρα υπάρχει μόνο στην ανατολική ουρά του κυρίως χειμάρρου («Αποστολόρεμα»), όπου τα νερά του σε μικρό τμήμα έρχονται σε επαφή με καρστικούς υδροπερατούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι συνεχίζουν σε μεγάλο βάθος και οδηγούν τα διηθούμενα νερά εκτός του ταμιευτήρα. Σύμφωνα με την γεωλογική χαρτογράφηση 1:5000 (βλ. γεωλογικό – υδρογεωλογικό χάρτη παραρτήματος) το πρόβλημα αυτό δημιουργείται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 195 m περίπου διότι μέχρι εκεί επικρατούν οι στεγανοί φυλλίτες.

Οι ασβεστόλιθοι της νότιας ουράς, των «Κεφαλοβρυσσών», δεν δημιουργούν πρόβλημα στεγανότητας γιατί από κάτω υπάρχουν οι αδιαπέρατοι σχιστόλιθοι. Τα διηθούμενα σε αυτούς νερά κινούνται προς τον ταμιευτήρα και εκφορτίζονται μέσω πηγών σε αυτόν. Έτσι λοιπόν ενώ η αρχική μελέτη περιλάμβανε την μελέτη των διαρροών της ουράς του «Αποστολορέματος», λόγω μειωμένης στάθμης ύδατος την περίοδο της παρούσας έρευνας, η μελέτη επαναπροσδιορίστηκε στην μελέτη της τροφοδοσίας των «Κεφαλοβρυσσών» από το φαράγγι του Αγίου Αντωνίου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως, παρά την δύσκολη προσβασιμότητα που είχε η περιοχή της χαρτογράφησης, υπήρχε η κατάλληλη μορφολογία για τις πτήσεις του εξακόπτερου και δεν δημιουργήθηκε κανένα πρόβλημα κατά την πτήση, όπως για παράδειγμα κίνδυνος σύγκρουσης σε απότομο πρανές ή επικίνδυνα δέντρα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο επόμενο Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης με έμφαση να δίνεται στις θερμικές καταγραφές.

# Κεφάλαιο 3: Τηλεπισκόπηση και θερμικές καταγραφές

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά σε βασικές έννοιες όπως για παράδειγμα της Τηλεπισκόπησης, του θερμικού φάσματος, της θερμογραφίας, της επεξεργασίας και της ερμηνείας των θερμικών εικόνων, οι οποίες θα φανούν χρήσιμες στα επόμενα Κεφάλαια.

## 3.1 Έννοια της Τηλεπισκόπησης

Η Τηλεπισκόπηση ή Τηλεανίχνευση (Remote Sensing) καλείται η διαδικασία με την οποία λαμβάνονται πληροφορίες για ένα αντικείμενο, μια περιοχή ή ένα φαινόμενο και επιτυγχάνεται με τη χρήση ανιχνευτικών συσκευών που δεν βρίσκονται σε επαφή με το αντικείμενο παρατήρησης. Στις γεωεπιστήμες, η Τηλεπισκόπηση σημαίνει απόκτηση πληροφοριών για τη γήινη επιφάνεια με την από απόσταση μέτρηση και αποτύπωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα. Η καταγραφή των δεδομένων από απόσταση μπορεί να γίνει από επίγειους (π.χ. φωτογραφικές μηχανές), εναέριους (π.χ. UAV, επανδρωμένα αεροσκάφη) και δορυφορικές πλατφόρμες.

Η Τηλεπισκόπηση αποτελείται από τρείς παραμέτρους:

- Τους στόχους που συνιστούν τα υπο-μελέτη αντικείμενα ή φαινόμενα μιας περιοχής.
- Την τεχνική συλλογής δεδομένων με τη βοήθεια οργάνων που βρίσκονται σε απόσταση από τους στόχους.
- Την ανάλυση και την ερμηνεία των δεδομένων.

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης περιλαμβάνει πολλές μορφές καταγραφής δεδομένων όπως τη συμβατική φωτογραφία, την αεροφωτογραφία, την λήψη εικόνων με Radar, τις μετρήσεις βαρύτητας, μαγνητικού πεδίου κ.α. Παρ' όλα αυτά όμως οι μελέτες της επιστήμης αυτής εστιάζονται μόνο σε συστήματα απεικονίσεων (αεροφωτογραφία, δορυφορικές εικόνες) και όχι σε συστήματα απευθείας μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (βαρυτόμετρα, μαγνητόμετρα κ.α.)

Μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης στις γεωεπιστήμες είναι οι παρακάτω: (Μερτίκας, 2009)

1. Παρατήρηση ωκεανών
    - Μετρήσεις θερμοκρασίας στη θαλάσσια επιφάνεια.
    - Χαρτογράφηση του θαλάσσιου πυθμένα.
2. Οικολογία
    - Ανίχνευση ρύπανσης ωκεανών, ατμοσφαιρικού αέρα και εδάφους.
    - Ανίχνευση πετρελαιοκηλίδων.

3. Ανίχνευση ορυκτών πόρων
    - Γεωλογική χαρτογράφηση.
    - Ανίχνευση κοιτασμάτων.
    - Ανίχνευση υδρογονανθράκων.
4. Τεκτονική πλακών
5. Μελέτη βλάστησης.

Άλλες εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν τη Μετεωρολογία, την Αρχαιολογία, στρατιωτικές εφαρμογές κ.α. Παρατηρείται λοιπόν ότι η Τηλεπισκόπηση συνδέεται στενά με το αντικείμενο του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων, καθώς υπάρχουν πολλές εφαρμογές που μπορεί να καταγράψει πολύτιμες πληροφορίες. Μια από τις κυριότερες έννοιες της Τηλεπισκόπησης είναι η αεροφωτογραφία.

## 3.2 Έννοια της αεροφωτογραφίας και διάκριση αισθητήρων Τηλεπισκόπησης

Η έννοια της αεροφωτογραφίας περιλαμβάνει οποιαδήποτε φωτογραφία της γήινης επιφάνειας, η οποία έχει ληφθεί από εναέρια (πτητικά) μέσα (όπως για παράδειγμα αεροπλάνα, αερόστατα, διαστημόπλοια και UAVs, κλπ.). Οι δέκτες των συστημάτων της Τηλεπισκόπησης χωρίζονται στους φωτογραφικούς και μη φωτογραφικούς. Οι μεν φωτογραφικοί λειτουργούν στο ορατό φάσμα και σε ένα τμήμα του υπεριώδους, δηλαδή σε μήκη κύματος από 0,3 μm έως 0,9 μm, ενώ οι δε μη – φωτογραφικοί, οι οποίοι μπορεί να είναι π.χ. σαρωτές, λειτουργούν σε φασματικό εύρος από τις ακτίνες Χ μέχρι τα ραδιοκύματα.

Επιπλέον, οι δέκτες της Τηλεπισκόπησης διαχωρίζονται ανάλογα με την διακριτική τους ικανότητα που μπορεί να είναι τεσσάρων ειδών:

- Η γεωμετρική διακριτική ικανότητα (ή χωρική ανάλυση) καθορίζει την ελάχιστη επιφάνεια του εδάφους για την οποία μπορεί να γίνει παρατήρηση. Στις ψηφιακές απεικονίσεις, αυτό ορίζεται σαν μέγεθος του εικονοστοιχείου στο έδαφος συνήθως σε m.
- Η φασματική διακριτική ικανότητα αφορά την δυνατότητα του δέκτη να αντιλαμβάνεται πληροφορία σε διαφορετικά μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα διαστήματα του Η/Μ φάσματος που ο δέκτης μπορεί να πάρει μεμονομένες μετρήσεις ονομάζεται κανάλι της τηλεσκοπικής απεικόνισης. Υπάρχουν τηλεπισκοπικά δεδομένα με 3 κανάλια που παράγουν έγχρωμες εικόνες (στο εύρος του κόκκινου, πράσινου και μπλε φάσματος), ενώ υπάρχουν δεδομένα που μπορεί να έχουν πληροφορία στο υπέρυθρο, υπεριώδες, ακόμα και στις ακτίνες Χ. Επιπλέον υπάρχουν

και δέκτες με μεγάλο πλήθος καναλιών που καλύπτουν σχεδόν όλο το Η/Μ φάσμα και ονομάζονται υπερφασματικοί δέκτες.

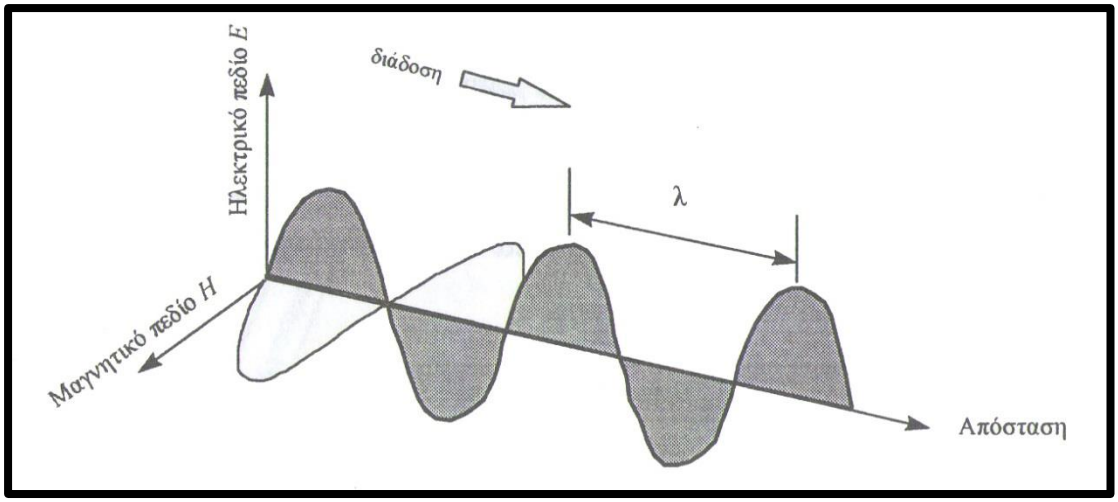
- Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα αφορά στην δυνατότητα που έχει ένας δέκτης να καταγράψει μεγάλο αριθμό διακριτών τιμών έντασης Η/Μ ακτινοβολίας. Μετρείται σε bit για τις ψηφιακές απεικονίσεις. Για παράδειγμα μια εικόνα 8 bit μπορεί να περιλαμβάνει σε ένα της κανάλι 256 (28) διαβαθμίσεις έντασης, που όταν αναπαρασταθούν σε μια οθόνη μπορούν να αποδοθούν σε 256 διαφορετικούς τόνους του γκρι.
- Τέλος, η χρονική διακριτική ικανότητα αφορά την ικανότητα του δέκτη να επαναλαμβάνει τη μέτρησή του πάνω από την ίδια περιοχή μελέτης. Π.χ. ο δέκτης Seviri λαμβάνει εικόνα κάθε 15 λεπτά πάνω από την ίδια περιοχή, ενώ ο δέκτης Thematic Mapper λαμβάνει εικόνα κάθε 13 μέρες.

Για την κατανόηση όμως της επιστήμης της Τηλεπισκόπησης και της αεροφωτογραφίας, είναι αναγκαίο να γίνει αναφορά στις ιδιότητες και στην συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη.

## 3.3 Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Κύμα ονομάζεται κάθε διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια με ορισμένη ταχύτητα που λέγεται ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από περιοδικές κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων, όπως για παράδειγμα ταλαντώσεις και περιστροφή μορίων, μεταπτώσεις ηλεκτρονίων σε διαφορετική τροχιά, κ.α. Οι κινήσεις αυτές δημιουργούν περιοδικές διαταραχές στο ηλεκτρικό τους πεδίο που με τη σειρά τους δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο $H$ κάθετο στο ηλεκτρικό $E$ (Σχήμα 3.1). Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ουσιαστικά αποτελεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, όπως και κάθε αρμονικό κύμα εμφανίζει τρία χαρακτηριστικά: το μήκος κύματος ($\lambda$), το οποίο είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κορυφών του αρμονικού κύματος, η συχνότητα ($\nu$) που είναι ο αριθμός των κορυφών, που διέρχονται από συγκεκριμένο σταθερό σημείο στη μονάδα του χρόνου και εκφράζεται σε Hertz και το πλάτος κύματος το οποίο είναι το ύψος της κάθε κορυφής του αρμονικού κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.1). Το μήκος κύματος και το πλάτος εκφράζονται σε μονάδες απόστασης (m).




Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης στον χώρο (Πηγή: Μερτίκας, 2009).

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (c) είναι σταθερή στον κενό χώρο και ίση με 299,893 km/second. Η συχνότητα (ν) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με την σχέση:

$$c = \lambda * \nu \tag{3.1}$$

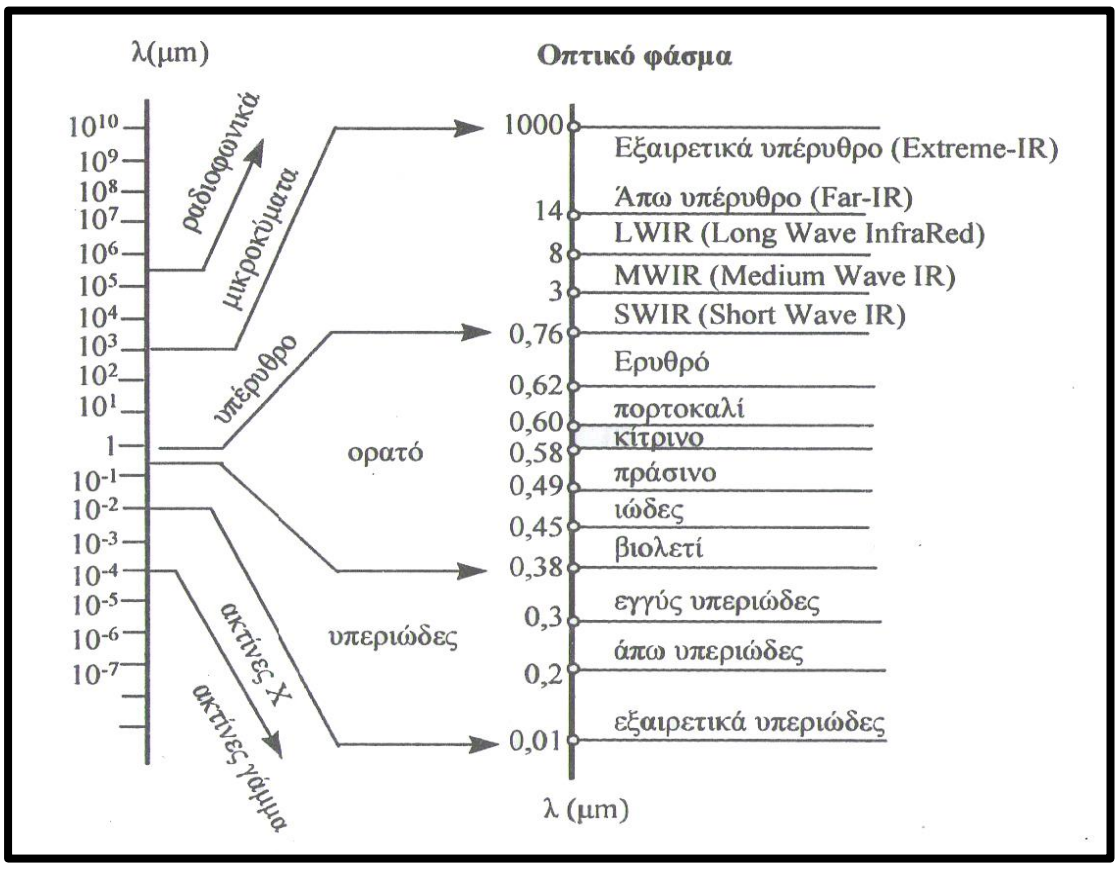
Η ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σύμφωνα με το μήκος κύματος ή σύμφωνα με τη συχνότητα ή την ενέργεια δημιουργεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Για την Τηλεπισκόπηση, το σημαντικότερο τμήμα του φάσματος αυτού είναι αυτό που δημιουργείται από την ακτινοβολία του Ήλιου.

## 3.4 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ακτινοβολίας

Το εύρος της περιοχής συχνοτήτων που καλύπτεται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Θεωρητικά το φάσμα αυτό εκτείνεται από μηδενικές συχνότητες έως το άπειρο, για τον ήλιο όμως το φάσμα εκτείνεται από τις ακτίνες γάμμα (μικρό μήκος κύματος και υψηλή ενέργεια) μέχρι τα ραδιοκύματα (μεγάλο μήκος κύματος και χαμηλή ενέργεια). Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες (spectral bands), με βάση το μήκος κύματος (Πίνακας 3.1), οι οποίες μεταξύ τους παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Οι φασματικές αυτές ζώνες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.2).

Πίνακας 3.1: Οι φασματικές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος του Ήλιου (Πηγή: Μερτίκας, 2009).

| **Φασματική ζώνη** | **Μήκος κύματος (λ)** |
|---|---|
| Ακτίνες γάμμα | < 0,03 nm |
| Ακτίνες Χ | 0,03 nm – 300 nm |
| Υπεριώδης ακτινοβολία | 0,30 μm – 0,38 μm |
| Ορατό | 0,38 μm – 0,72 μm |
| Εγγύς Υπέρυθρο | 0,72 μm – 1,30 μm |
| Μέσο Υπέρυθρο | 1,30 μm – 3 μm |
| Άπω Υπέρυθρο | 7 μm – 15 μm |
| Μικροκύματα | 0,3 cm – 30 cm |
| Ραδιοφωνικά κύματα | ≥ 30 cm |




Σχήμα 3.2: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Πηγή: Μερτίκας, 2009).

Επίσης ο όρος εικόνα ή τηλεπισκοπική απεικόνιση, περιλαμβάνει οποιαδήποτε μορφής φασματική καταγραφή ανεξάρτητα από το μήκος κύματος ή την συσκευή λήψης της, ενώ ο όρος φωτογραφία περιλαμβάνει την καταγραφή που πραγματοποιείται σε μήκη κύματος 0,3

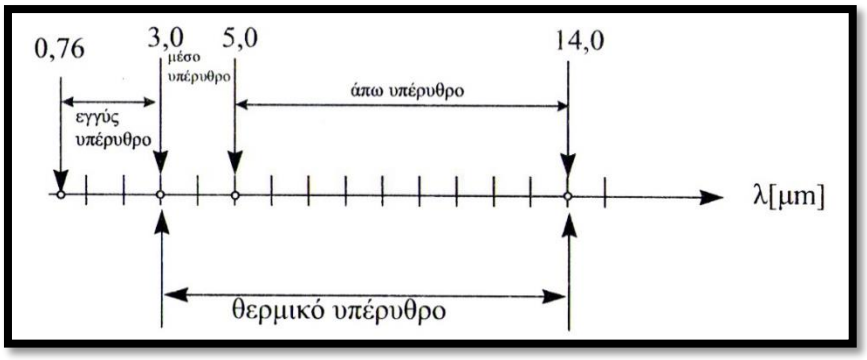
μm – 0,9 μm, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιούνται στην Τηλεπισκόπηση είναι η υπεριώδης, η ορατή, η υπέρυθρη και τα μικροκύματα.

## 3.5 Η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από μήκος κύματος 0,76 μm μέχρι 1000 μm (1 mm) αντιστοιχεί στο υπέρυθρο (infrared) φάσμα (Σχήμα 3.3). Η ανακάλυψή του έγινε το 1800 από τον Herschel (1738 – 1822), έναν Βρετανό αστρονόμο που ερευνούσε τη σχέση μεταξύ θερμότητας και ορατής ακτινοβολίας. Αργότερα, το 1847 δύο Γάλλοι, ο Fizeau (1819 – 1822) και ο Foucault (1819 – 1868), έδειξαν ότι η υπέρυθρος ακτινοβολία έχει οπτικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του ορατού όσον αφορά την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη συμβολή (Μερτίκας, 2009).

Η υπέρυθρος ακτινοβολία διακρίνεται στην ανακλώμενη (reflected indrared) και στη θερμική υπέρυθρη (thermal infrared). Ανακλώμενη είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο και ανακλάται από την επιφάνεια του εδάφους. Θερμική είναι η υπέρυθρη ακτινοβολία με μήκος κύματος 3 μm έως και 1000 μm, η οποία εκπέμπεται από την Γη. Η υπέρυθρη περιοχή του φάσματος διαιρείται σε τρεις επιμέρους ζώνες: στο εγγύς, στο μέσο και στο άπω υπέρυθρο:

- Η ζώνη του εγγύς υπέρυθρου (near infrared) συμπεριφέρεται με ιδιότητες ανάλογες του ορατού. Αποτελεί το ανακλώμενο υπέρυθρο που εκτείνεται από 0,76 μm μέχρι 3,0 μm και δεν χρησιμοποιείται σε θερμικές καταγραφές.
- Το μέσο υπέρυθρο (middle infrared) περιλαμβάνει μήκη κύματος από 3 μm έως 5 μm και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανίχνευση στόχων υψηλών θερμοκρασιών, όπως πυρκαγιών, λάβας και άλλων θερμών πηγών, επειδή σύμφωνα με τον νόμο μετατοπίσεων του Wien το μέγιστο της ακτινοβολούμενης ενέργειας αντιστοιχεί σε φασματική καμπύλη με θερμοκρασία 600 K (327$^{o}$ C) περίπου.
- Η ζώνη του άπω υπέρυθρου αντιστοιχεί σε μήκη κύματος 8 μm έως 14 μm και χρησιμοποιείται για την παρατήρηση δασών, αυτοκινητόδρομων, αεροδρομίων και γενικά στόχων που παρουσιάζουν μέτριες θερμοκρασίες, οι οποίες είναι 300 K (27$^{o}$ C) περίπου.




Σχήμα 3.3: Η φασματική ζώνη του υπέρυθρου (Πηγή: Μερτίκας, 2009).

### 3.5.1 Θερμικές ιδιότητες υλικών

Για να γίνει σωστή ερμηνεία των θερμικών υπέρυθρων εικόνων, απαιτείται η κατανόηση των βασικών φυσικών φαινομένων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις της θερμικής ενέργειας με την ύλη καθώς και με τις θερμικές ιδιότητες των υλικών.

Είναι γνωστό, πως όταν ένα θερμό σώμα έρθει σε επαφή με ένα ψυχρό, τότε το θερμό σώμα ψύχεται ενώ το ψυχρό θερμαίνεται. Θερμότητα είναι η ενέργεια Q που μεταφέρεται από το θερμό στο ψυχρό σώμα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας.

Οι βασικές θερμικές ιδιότητες των σωμάτων είναι:

- Θερμίδα (calorie ή cal). Ορίζεται το ποσό της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για να αυξηθεί κατά 1ºC η θερμοκρασία 1 g καθαρού νερού.
- Πυκνότητα (δ) ενός σώματος είναι η μάζα ανά μονάδα όγκου [kg/m$^3$] και αποτελεί μια άλλη ιδιότητα των υλικών που παίζει ρόλο στον καθορισμό της κατανομής της θερμοκρασιακής απόκρισης των υλικών.
- Η θερμοχωρητικότητα (c) (Thermal capacity). Εκφράζει τον αριθμό των θερμίδων που απαιτούνται για να αυξηθεί η θερμοκρασία σώματος 1 gr κατά 1$^o$ C και μετριέται σε calorie/gr $^o$ C. Ουσιαστικά είναι η ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει θερμότητα. Το νερό έχει πολύ μεγάλη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τα περισσότερα υλικά.
- Η θερμική αγωγιμότητα (K) (Thermal conductivity). Αποτελεί ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο ένα υλικό μεταφέρει θερμότητα. Εκφράζει σε cal ανά cm, ανά sec και ανά $^o$ C (cal cm $^{-1}$ sec $^{-1}$ $^o$ C $^{-1}$) δηλαδή μετράει τις θερμίδες που απαιτούνται για να μεταφερθεί μια μεταβολή στη θερμοκρασία σε συγκεκριμένο διάστημα και χρόνο.
- Ανακλαστικότητα (R) (Reflectance). Εκφράζει το ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από μια επιφάνεια.
- Η θερμική αδράνεια (P) (Thermal inertia). Μετράει την τάση ενός υλικού να ανθίσταται σε αλλαγές της θερμοκρασίας του και εκφράζεται σε cal ανά cm$^2$ ανά sec$^{1/2}$

και ανά $^{o}$ C. Η θερμική αδράνεια σχετίζεται με τις προηγούμενες θερμικές παραμέτρους με τη σχέση:

$$P = (Kc\delta)^{1/2} \quad (3.2)$$

- Θερμική διαχυτικότητα κ (Thermal diffusivity). Η παράμετρος αυτή εκφράζει την ικανότητα των υλικών να μεταφέρουν θερμότητα από την επιφάνεια του εδάφους στο υπέδαφος κατά τη διάρκεια μιας θερμής ημέρας και από το υπέδαφος στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της νύχτας. Δίνεται από τη σχέση:

$$\kappa = K/(cp) \quad (3.3)$$

και εκφράζεται σε $cm^2/sec$.

- Η ειδική θερμότητα $c_p$ (specific heat) ενός υλικού είναι το μέτρο της ποσότητας της θερμικής ενέργειας Q που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά 1$^{o}$ C μάζας 1 kg υλικού. Τυπικές τιμές για την ειδική θερμότητα $c_p$ πετρωμάτων είναι της τάξεως περίπου των 200 cal/(kg· $°C$).

Ακολουθεί πίνακας με ενδεικτικές τιμές θερμικών ιδιοτήτων μερικών υλικών της γήινης επιφάνειας (Πίνακας 3.2).

### 3.5.2 Θερμικές υπέρυθρες εικόνες στο αντικείμενο του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων

Οι εικόνες θερμικού υπέρυθρου είναι χρήσιμες σε πολλές εφαρμογές στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και το αντικείμενο του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων, μερικές από τις εφαρμογές αυτές είναι οι παρακάτω:

- ✓ Διαχωρισμός τύπων πετρωμάτων.
- ✓ Χαρτογράφηση επιφανειακής υγρασίας.
- ✓ Χαρτογράφηση επιφανειακών θερμοκρασιών.
- ✓ Παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η χαρτογράφηση της επιφανειακής υγρασίας αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Οι εικόνες του θερμικού υπέρυθρου ενδείκνυνται για τέτοιου είδους εφαρμογές καθώς στο υγρό έδαφος δημιουργείται εξάτμιση, η οποία το ψύχει, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ψυχρότερο (πιο σκούρο) από ότι το ξηρό έδαφος στις θερμικές καταγραφές, κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και της νύχτας. Επίσης με τον τρόπο αυτό μπορούν να ανιχνευτούν γεωλογικά ρήγματα, λόγω της συγκεντρωμένης τους υγρασίας κατά μήκος της ζώνης ρήξεως, βάσει διαφοράς θερμοκρασίας.

Πίνακας 3.2: Μερικές τυπικές τιμές υλικών στους 20$^{o}$ C (Πηγή: Janza et al., 1975).

| **Υλικό** | **Θερμική αγωγιμότητα K [cal/m·s·°C]** | **Πυκνότητα δ [kg/m$^3$]** | **Ειδική θερμότητα $c_p$ [cal/kg°C]** | **Θερμική αδράνεια P [cal/m$^2$s$^{1/2}$°C]** |
|---|---|---|---|---|
| Βασάλτης (basalt) | 0,50 | 2800 | 200 | 530 |
| Αργιλικό έδαφος, υγρό (Clay) | 0,30 | 1700 | 350 | 420 |
| Δολομίτης (dolomite) | 1,20 | 2600 | 180 | 750 |
| Γάββρος (Gabbro) | 0,60 | 3000 | 170 | 550 |
| Γρανίτης (Granite) | 0,75 | 2600 | 160 | 560 |
| Χάλικες (Gravel) | 0,30 | 2000 | 180 | 330 |
| Ασβεστόλιθος (Limestone) | 0,48 | 2500 | 170 | 450 |
| Μάρμαρο (Marble) | 0,55 | 2700 | 210 | 560 |
| Οψιδιανός (Obsidian) | 0,30 | 2400 | 170 | 350 |
| Περιδοτίτης (Peridotite) | 1,10 | 3200 | 200 | 840 |
| Κίσσηρης (Pumice) | 0.06 | 1000 | 160 | 90 |
| Χαλαζίτης (Quartzite) | 1,20 | 2700 | 170 | 740 |
| Ρυόλιθος (Rhyolite) | 0,55 | 2500 | 160 | 470 |
| Αμμώδεις χάλικες (Sandy gravel) | 0,60 | 2100 | 200 | 500 |
| Αμμώδες έδαφος (Sandy soil) | 0,14 | 1800 | 240 | 240 |
| Χαλαζιακός ψαμμίτης (Sandstone) | 1,20 | 2500 | 190 | 750 |
| Σερπεντίνης (Serpentine) | 0,63 | 2400 | 230 | 590 |
| Αργιλικός σχιστόλιθος (Shale) | 0,42 | 2300 | 170 | 410 |
| Φυλλίτης (Slate) | 0,50 | 2800 | 170 | 490 |
| Συηνίτης (Syenite) | 0,77 | 2200 | 230 | 620 |
| Εξαλλοιωμένος τόφφος (Tuff welded) | 0,28 | 1800 | 200 | 320 |
| Αλουμίνιο | 0,54 | 2690 | 215 | 558 |
| Μόλυβδος | 0,08 | 11340 | 31 | 171 |
| Χαλκός | 0,94 | 8930 | 92 | 879 |
| Νερό | 0,13 | 1000 | 1010 | 370 |

## 3.6 Βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας, καθώς η κατανόηση του τρόπου διάδοσής της είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αναφορά στην μέθοδο της θερμογραφίας, η οποία είναι και η μέθοδος που θα εφαρμοστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η θερμότητα λοιπόν, μπορεί να διαδοθεί με: α) αγωγή, β) θερμική μεταβίβαση, και γ) ακτινοβολία.

### 3.6.1 Μεταφορά με αγωγή

Στη μεταφορά με αγωγή, η μετάδοση της θερμότητας γίνεται μέσω της μάζας των σωμάτων. Η αγωγιμότητα του κάθε σώματος χαρακτηρίζει τη δυσκολία μεταφοράς της θερμότητας δια μέσου του. Έτσι για παράδειγμα καλοί αγωγοί είναι τα μέταλλα (εύκολη διάδοση θερμότητας), ενώ κακοί αγωγοί (χαμηλή ή μηδενική διάδοση θερμότητας) είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).

### 3.6.2 Μεταφορά της θερμότητας με θερμική μεταβίβαση

Η μεταφορά της θερμότητας σε ένα ρευστό μπορεί να πραγματοποιηθεί επίσης μέσω της μάζας του με την κίνησή του. Η κίνηση αυτή ονομάζεται φυσική διάχυση όταν γίνεται σε φυσικό μέσο, όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές, ενώ όταν γίνεται βεβιασμένα, τότε καλείται βίαιη διάχυση. Η μεταφορά θερμότητας με θερμική μεταβίβαση είναι μακροσκοπικό φαινόμενο και παρατηρείται κατά την διάχυση των ρευστών. Η διαφορά πυκνοτήτων διαφόρων ρευστών προκαλεί φυσική διάχυση όπως, για παράδειγμα, η κίνηση του κρύου αέρα προς τα κάτω σε αντίθεση με τον ζεστό που κινείται προς τα πάνω. Αντίστοιχα, η μηχανική ανάμειξη, για παράδειγμα η λειτουργία ενός ανεμιστήρα, προκαλεί βεβιασμένη διάχυση. Μεταφορά με θερμική μεταβίβαση παρατηρείται επίσης, μεταξύ ρευστού με στερεό σώμα (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).

### 3.6.3 Μεταφορά με ακτινοβολία

Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκονται, τον συντελεστή εκπομπής τους, και διάφορες άλλες παραμέτρους. Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη αποκλειστικά με αυτό τον τρόπο μεταφοράς. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία μεταδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δεν απαιτείται η παρουσία ενός ενδιάμεσου μέσου. Όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε ένα άλλο σώμα ή θα απορροφηθεί ή θα ανακλαστεί ή θα μεταφερθεί. Η θερμότητα που απορροφάται εμφανίζεται ως αύξηση θερμοκρασίας ενός σώματος.

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα εκφράζεται ως εξής:

$$q = \varepsilon * \sigma * (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.4)$$

όπου

q: Η εκπεμπόμενη ενέργεια [Watt/$m^2$]

ε: Ο συντελεστής εκπομπής υλικού

σ: Σταθερά Stefan - Boltzmann

T: Απόλυτη θερμοκρασία °K

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως νόμος των Stefan – Boltzmann.

Οι ιδιότητες αυτές αξιοποιούνται από την θερμογραφία έτσι ώστε να προκύπτουν τα θερμογραφήματα (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).

## 3.7 Η μέθοδος της θερμογραφίας

Η θερμογραφία είναι η τεχνική εκείνη με την οποία ανιχνεύονται οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Η οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος ονομάζεται θερμογράφημα. Με την τεχνική της θερμογραφίας προσδιορίζονται και ερμηνεύονται οι θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται σε μια περιοχή ή κατασκευή, με αποτέλεσμα να εξάγονται πολύτιμα γι' αυτήν συμπεράσματα. Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας γίνεται έμμεσα μέσω της μεταβολής της επιφανειακής ακτινοβολίας. Η τεχνική βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10 μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος).

Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες), οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, όπου με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία. Με την θερμογραφία εντοπίζονται απώλειες θερμότητας από ένα κτήριο, διαφορετικά υλικά μέσα σε μια κατασκευή, επιφανειακές κινήσεις ύδατος ανάμεσα από εδαφικά υλικά κ.α. (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).

### 3.7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την θερμογραφία

Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που μετρείται κατά την θερμογράφιση είναι:

- η ικανότητα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας (εκφράζεται από τον συντελεστή εκπομπής και συγκρίνεται με εκείνη του μέλανος σώματος).
- η επιφανειακή θερμοκρασία.
- η θερμική αγωγιμότητα.
- η θερμοχωρητικότητα.
- το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος.
- η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τον συντελεστή εκπομπής του υλικού. Γενικά τα δομικά υλικά έχουν μεγάλο συντελεστή εκπομπής (μεγαλύτερο από 0,8) (Κορωναίος και Σαργέντης, 2003).

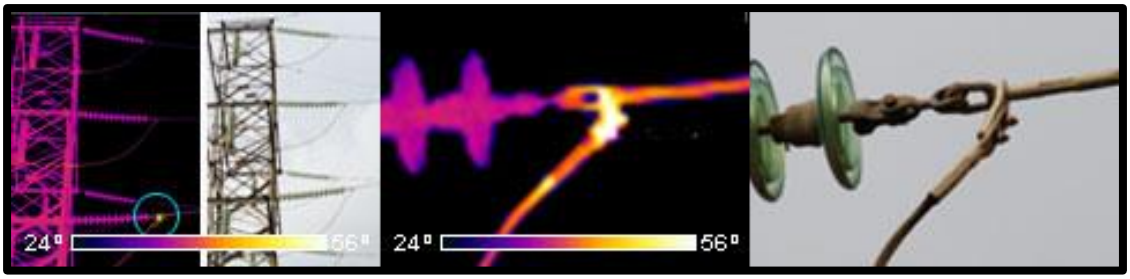
### 3.7.2 Πλεονεκτήματα και χρήσεις της μεθόδου

Η θερμογραφία είναι ένα μη καταστρεπτικό χρήσιμο εργαλείο για κάθε μηχανικό. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα παρακάτω:

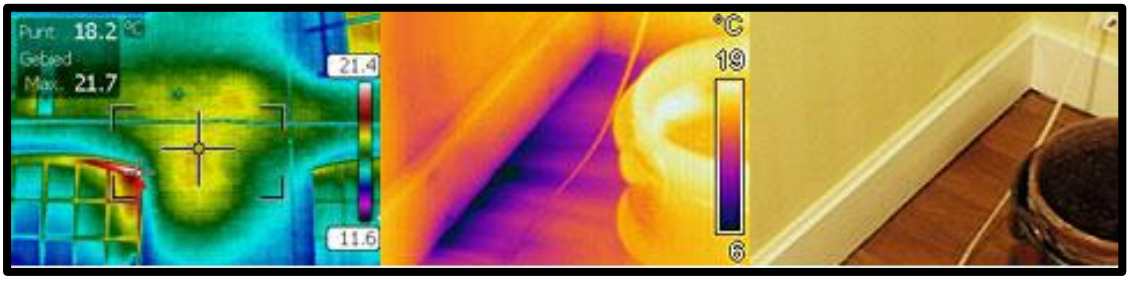
- Γρήγορη και αποτελεσματική χαρτογράφηση μεγάλων περιοχών.
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου, του ανθρώπινου δυναμικού και των συσκευών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της χαρτογράφησης.
- Εφαρμογή της μεθόδου κατά την διάρκεια της μέρας ή της νύχτας ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το υπο-μελέτη αντικείμενο.
- Αποφυγή καταστροφών της υπο-μελέτης περιοχής.

Επιγραμματικά, οι σημαντικότερες χρήσεις της θερμογραφίας είναι οι παρακάτω :

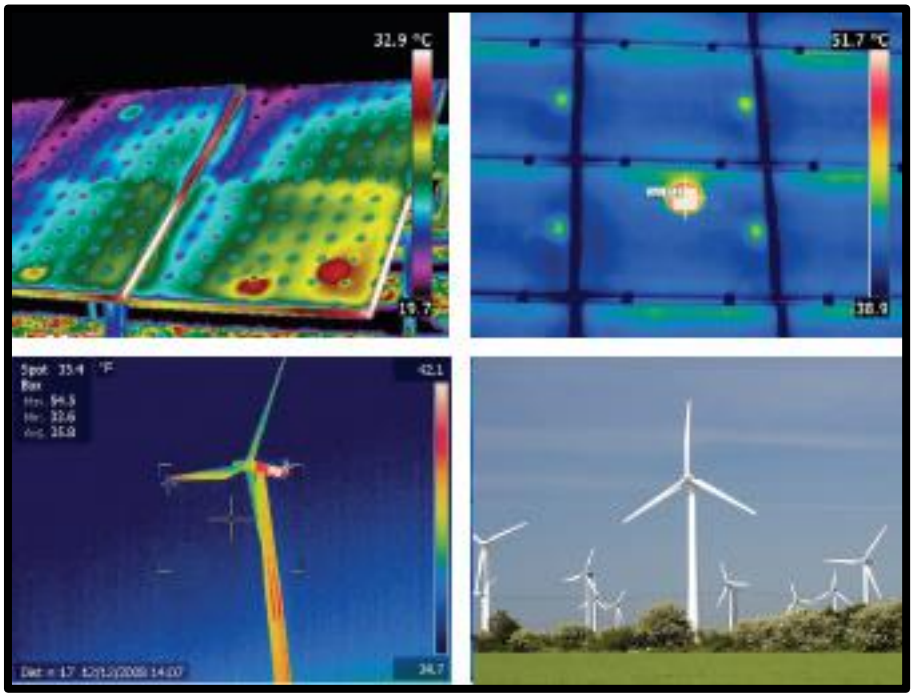
- Πρόληψη αστοχίας σε ηλεκτρολογικές, μηχανολογικές εγκαταστάσεις.
- Ενεργειακός έλεγχος σε κτήρια.
- Ενεργειακός έλεγχος σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.




Σχήμα 3.4: Εντοπισμός αυξημένης θερμοκρασίας σε ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις (Πηγή: Flir Systems Inc, 2013).




Σχήμα 3.5: Εντοπισμός προβλημάτων μόνωσης και εισροής κρύου αέρα σε δάπεδο κτηρίου (Πηγή: Flir Systems Inc, 2013).




Σχήμα 3.6: Έλεγχος σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: Flir Systems Inc, 2013).

## 3.8 Επεξεργασία και ερμηνεία θερμικών καταγραφών

Επεξεργασία εικόνας (image processing) καλείται η αλγοριθμική επεξεργασία, ανάλυση και χειρισμός ψηφιακών δεδομένων εικόνας ή βίντεο με σκοπό την λήψη πληροφοριών, τα οποία δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν με το γυμνό μάτι. Ένα μέρος της επεξεργασίας εικόνας αποτελεί η σύνθεση των εικόνων μεταξύ τους, με σκοπό την δημιουργία μωσαϊκού. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά πακέτα (software), τα οποία αυτοματοποιούν την παραπάνω διαδικασία εισάγοντας τους ο χρήστης τις επιθυμητές εικόνες και μερικά στοιχεία όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο αυτές λήφθηκαν. Η δημιουργία και ο αλγόριθμος του μωσαϊκού που θα κατασκευαστεί στην παρούσα εργασία θα επεξηγηθεί στο Κεφάλαιο 7. Μετά την διαδικασία της συνένωσης των εικόνων είναι απαραίτητο να γίνουν στην τελική εικόνα κάποιες διορθώσεις, οι οποίες προέρχονται από σφάλματα του ανιχνευτή (ραδιομετρική διόρθωση) ή / και στον τρόπο λήψης των εικόνων (γεωμετρική διόρθωση).

### 3.8.1 Ραδιομετρική διόρθωση

Η ραδιομετρική τιμή ενός εικονοστοιχείου της εικόνας (pixel) μπορεί να μεταβληθεί από σφάλματα κατά την καταγραφή. Τέτοια σφάλματα μπορεί να είναι στην απόκριση του ανιχνευτή, στον ηλεκτρονικό θόρυβο, από μεταβολές στις συνθήκες φωτισμού κ.α. Υπάρχουν δυο τύποι ραδιομετρικών παραμορφώσεων στην εικόνα :

1. Παραμόρφωση της σχετικής φωτεινότητας ενός συγκεκριμένου εικονοστοιχείου σε μια εικόνα σε σχέση με τα υπόλοιπα.
2. Καταγραφή διαφορετικής τιμής ακτινοβολίας από έναν ανιχνευτή σε σχέση με την ακτινοβολία του στόχου στο έδαφος.

Έτσι κατά την συγκεκριμένη διόρθωση μετασχηματίζονται οι τιμές των εικονοστοιχείων με βάση υποθέσεις και μοντέλα, αφού δεν είναι δυνατόν κάθε φορά να μπορεί να αναγνωριστεί η πραγματική τιμή της ακτινοβολίας του εδάφους. Στην περίπτωση της διπλωματικής αυτής εργασίας δεν πραγματοποιήθηκε ραδιομετρική διόρθωση, καθώς δεν υπήρχαν αξιοσημείωτα σφάλματα από τον ανιχνευτή, παρά μόνο η γεωμετρική, η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

### 3.8.2 Γεωμετρική διόρθωση - Γεωαναφορά εικόνων

Η διόρθωση αυτή χρειάζεται, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να συμβάλουν στην γεωμετρική παραμόρφωση της εικόνας κατά την διαδικασία της λήψης ή κατά την διαδικασία της συνένωσής τους σε μωσαϊκό στη συνέχεια. Έτσι, χρειάζεται να γίνει διόρθωση της εικόνας, με σκοπό αυτή να διαθέτει τις γεωμετρικές ιδιότητες και το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων μιας χαρτογραφικής προβολής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την γεωμετρική παραμόρφωση της εικόνας μπορεί να είναι οι εξής (Μερτίκας, 2009):

- Η θέση και ο προσανατολισμός της πλατφόρμας λήψης. Πιο συγκεκριμένα οι γωνίες του διατοιχισμού (roll), του προνευστασμού (pitch) και της αμφιπρώρησης (yaw) της πλατφόρμας επηρεάζουν σημαντικά την γεωμετρική παραμόρφωση.
- Η ταχύτητα της πλατφόρμας λήψης επίσης δημιουργεί παραμορφώσεις στην γεωμετρία της εικόνας. Για τον λόγο αυτό το η πλατφόρμα πρέπει να διατηρεί σταθερή ταχύτητα κατά την πτήση της λήψης, η οποία πρέπει να επιλέγεται συναρτήση της ταχύτητας του κλείστρου της κάμερας λήψης.
- Οι ατμοσφαιρικές διαταράξεις (όπως άνεμος, νεφοκάλυψη, ατμοσφαιρική διάθλαση κλπ.) επιδρούν με τη σειρά τους στις παραμορφώσεις. Για παράδειγμα δυνατοί άνεμοι μπορεί να εκτρέψουν την πορεία της εναέρια πλατφόρμας.
- Τέλος, το ανάγλυφο του εδάφους (απότομα πρανή, κοιλάδες κλπ.) συμβάλει στις αλλοιώσεις της εικόνας όσον αφορά την γεωμετρία της.

Γεωαναφορά μιας εικόνας, καλείται η διαδικασία κατά την οποία, μια ψηφιακή εικόνα μετασχηματίζεται ώστε να διαθέτει τις γεωμετρικές ιδιότητες και το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων μιας χαρτογραφικής προβολής. Το σύστημα αναφοράς αυτό, μπορεί να είναι είτε τοπικό είτε παγκόσμιο (Μερτίκας, 2009).

Τα στάδια της γεωαναφοράς είναι τα εξής :

1. Εντοπισμός σημείων με γνωστές συντεταγμένες σε επιθυμητό σύστημα αναφοράς (τοπικό ή παγκόσμιο) που καλούνται «εδαφικά σημεία ελέγχου» (Ground Control Points - GCPs). Τα σημεία αυτά θα επεξηγηθούν στην επόμενη παράγραφο.
2. Με την βοήθεια συγκεκριμένων αλγορίθμων, ακολουθεί η μετατροπή των συντεταγμένων εδάφους της εικόνας, σε συντεταγμένες της γεωαναφερόμενης εικόνας με μέγεθος πλέγματος στο σύστημα αναφοράς ανάλογα με την χωρική ανάλυση της εικόνας.
3. Στη συνέχεια εντοπίζονται οι τιμές φωτεινότητας (DN) της αρχικής εικόνας που πρέπει να δοθούν στην γεωαναφερόμενη εικόνα. Για τον λόγο του ότι το σημείο ελέγχου στις υπολογιζόμενες συντεταγμένες της γεωαναφερόμενης εικόνας δεν συμπίπτει με το κέντρο του αντίστοιχου εικονοστοιχείου στην αρχική εικόνα, αλλά κάπου εντός της κυψελίδας που σχηματίζει το πλέγμα του συστήματος αναφοράς, η τιμή της φωτεινότητας του εικονοστοιχείου υπολογίζεται με μεθόδους παρεμβολής.

Οι σημαντικότερες μέθοδοι παρεμβολής είναι οι εξής:

a. Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου (Nearest neighbor method).
b. Η μέθοδος της διγραμμικής παρεμβολής (Bilinear interpolation).
c. Η μέθοδος της δικυβικής παρεμβολής (Bicubic interpolation).

### 3.8.2.1 Γεωμετρική διόρθωση με πολυώνυμα

Η διόρθωση αυτή βασίζεται στον καθορισμό ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο μετασχηματίζει την εικόνα ανεξάρτητα από την πηγή και του είδους της γεωμετρικής παραμόρφωσης, στην οποία υπόκειντο. Στους μετασχηματισμούς αυτούς, βασικό κριτήριο επιλογής αποτελούν τα κοινά σημεία ή εδαφικά σημεία ελέγχου (GCPs) που υπάρχουν στις εικόνες και διακρίνονται οι εξής αλγόριθμοι μετασχηματισμών:

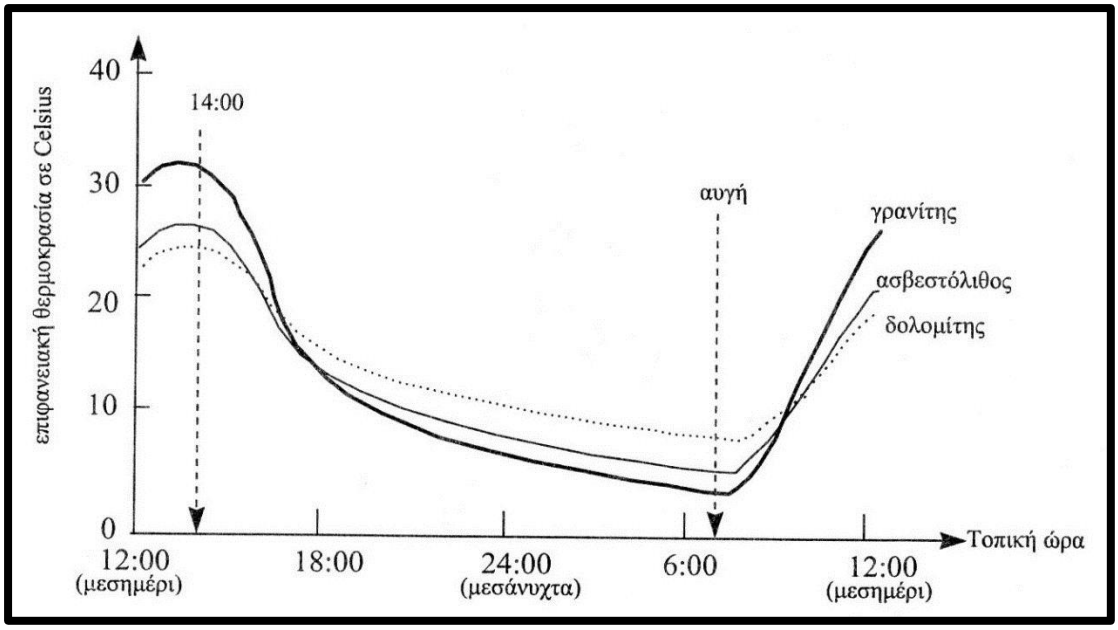
- Ο μετασχηματισμός ομοιότητας ή σύμμορφος μετασχηματισμός 2$^{ου}$ βαθμού.
- Ο αφινικός μετασχηματισμός 2$^{ου}$ βαθμού.
- Ο διγραμικός μετασχηματισμός.
- Ο πολυωνυμικός μετασχηματισμός 2$^{ου}$ βαθμού.

### 3.8.2.2 Εδαφικά σημεία ελέγχου - φωτοσταθερά

Αρχικά με την έννοια φωτοσταθερό εννοείται σαφώς προσδιοριζόμενο σημείο για τα οποίο είναι γνωστές οι γεωδαιτικές του συντεταγμένες. Τα φωτοσταθερά μπορεί να είναι προσημασμένα με κατάλληλους στόχους, ή σημεία λεπτομερειών τα οποία είναι προσεκτικά επιλεγμένα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδια φωτοσταθερά και πιο συγκεκριμένα πυρσοί πετρελαίου (δάδες). Η επιλογή αυτή έγινε διότι κατά την θερμική καταγραφή, σε αντίθεση με την οπτική, χρειάζεται κάποιο σημείο με εμφανή διαφορά θερμοκρασίας από το υπόλοιπο έδαφος και όχι μόνο ένα οπτικό σημείο αναφοράς. Έτσι λοιπόν, η φλόγα του πυρσού αποτέλεσε την βέλτιστη λύση για την συγκεκριμένη περίπτωση και χρησιμοποιήθηκαν τα συγκεκριμένα αυτοσχέδια φωτοσταθερά.

### 3.8.3 Ερμηνεία θερμικών εικόνων

Σύμφωνα με τον Μερτίκα (2009), υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για την κατανόηση της σημασίας των θερμοκρασιακών διαφοροποιήσεων στις υπέρυθρες εικόνες. Ο πρώτος τρόπος είναι να γίνει εμπειρική συσχέτιση μεταξύ φασματικών χαρακτηριστικών των επιφανειακών υλικών. Θερμές και ψυχρές περιοχές εδάφους συσχετίζονται και ελέγχονται με τις αντίστοιχες περιοχές στη θερμική εικόνα, ώστε να καθορισθεί η θερμική συμπεριφορά των επιφανειακών υλικών. Η εμπειρική αυτή μέθοδος είναι γρήγορη και άμεση, αλλά δεν λαμβάνει υπ' όψιν της τις υπάρχουσες φυσικές αιτίες για τη θερμική απόκριση των διαφορετικών επιφανειακών υλικών. Στον δεύτερο τρόπο, θεωρείται και υπολογίζεται μαθηματικό θερμικό μοντέλο, ώστε να συσχετισθεί η επιφανειακή θερμοκρασία με τις φυσικές ιδιότητες των επιφανειακών υλικών. Το μοντέλο βασίζεται στις φυσικές ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών και των θερμικών διαδικασιών που έπονται.




Σχήμα 3.7: Ημερήσια θερμική διακύμανση του δολομίτη, του ασβεστόλιθου και του γρανίτη (Πηγή: Μερτίκας, 2009).

Μια περιοδική ημερήσια διακύμανση στις θερμοκρασίες των επιφανειακών σωμάτων μπορεί να εκφρασθεί μαθηματικά από μια αρμονική συνάρτηση με κατάλληλες περιόδους. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν καμπύλες όπως εκείνες που φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. (Σχήμα 3.4) Τα μεγάλο πλεονέκτημα του δεύτερου τρόπου, με τα μοντέλα, είναι ότι αναλύονται θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες και τις θερμικές διεργασίες, που δίνουν τη δυνατότητα στον ερμηνευτή να τις κατανοήσει.

## 3.9 Σχεδιασμός υπέρυθρων διασκοπήσεων

Για την εκτέλεση υπέρυθρων διασκοπήσεων απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός τόσο όσον αφορά τον τρόπο όσο και την ώρα εκτέλεσης. Αρχικά, οι υπέρυθρες διασκοπήσεις διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Η μια αφορά τις απλές πτήσεις θερμικών διασκοπήσεων και η άλλη τις πολλαπλές πτήσεις με σκοπό την δημιουργία μωσαϊκού. Σημαντικός παράγοντας στις υπέρυθρες διασκοπήσεις είναι η ώρα της εκτέλεσης. Τα επιφανειακά υλικά εμφανίζουν μια διακύμανση στην θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας. Έτσι για μια σωστή θερμική διασκόπηση απαιτείται να γίνουν δύο λήψεις διαφορετικές ώρες κατά την διάρκεια του 24ώρου, η μια την ώρα που οι θερμοκρασίες είναι στο μέγιστο και μια όταν αυτές βρίσκονται στην ελάχιστη τιμή τους. Η μέγιστη θερμοκρασία του εδάφους εμφανίζεται μια ή δυο ώρες μετά την μεσημβρία δηλαδή 13:00 – 14:00, ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία αναμένεται το πρωί και συγκεκριμένα λίγο πριν την αυγή. Σε αυτήν, το έδαφος έχει καταλήξει σε μια θερμοκρασία η οποία αποκτήθηκε κατά την διάρκεια της νύχτας. Θα πρέπει λοιπόν να πραγματοποιηθούν δυο πτήσεις, η μία λίγο πριν ανατέλλει ο ήλιος και η άλλη κατά τις μεσημβρινές ώρες. Με τις

δυο αυτές πτήσεις θα μπορεί να γίνει μια ολοκληρωμένη ερμηνεία για την περιοχή μελέτης, καταγράφοντας και αξιολογώντας τις θερμικές διακυμάνσεις των επιφανειακών υλικών, κατά την διάρκεια της νύχτας και της ημέρας. Το σχέδιο πτήσης που δημιουργήθηκε για την παρούσα εργασία θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 6.

## 3.10 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, στο Κεφάλαιο αυτό έγινε μια αναφορά στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, ξεκινώντας από την επιστήμη της Τηλεπισκόπησης με τις εφαρμογές της και την έννοια της αεροφωτογραφίας, αναλύθηκε το ηλεκτρομαγνητικό και πιο συγκεκριμένα το θερμικό υπέρυθρο φάσμα. Στη συνέχεια, έγινε αναφορά στις βασικές αρχές μεταφοράς θερμότητας, με σκοπό να κατανοηθεί η μέθοδος της θερμογραφίας. Η μέθοδος αυτή είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για κάθε μηχανικό μέσω της οποίας μπορεί να μελετήσει διάφορες κατασκευές, όπως για παράδειγμα κτήρια, ηλεκτρολογικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, φράγματα κ.α. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εφαρμοστεί η μέθοδος της θερμογραφίας από θερμοκάμερα του Πολυτεχνείου Κρήτης, τοποθετημένη σε μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα πρότυπης κατασκευής, για την μελέτη επιφανειακών εισροών ύδατος στον ταμιευτήρα του φράγματος Αμαρίου. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAVs), οι εφαρμογές τους καθώς και τα αποτελέσματα της έρευνας αγοράς και της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης διαθέσιμων εμπορικών συστημάτων UAV.

# Κεφάλαιο 4: Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα (UAVs)

Ο όρος «μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα» χρησιμοποιείται για να αποδώσει στην Ελληνική γλώσσα τα συστήματα UAV (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ή UAS (Unmanned Aerial Systems: UAS). Τα παλαιότερα χρόνια ήταν γνωστά και ως RPV (Remotely Piloted Vehicle: RPV). Πρόκειται για κατασκευές που έχουν την δυνατότητα πραγματοποίησης πτήσεων χωρίς την ανάγκη ύπαρξης πιλότου στο εσωτερικό τους. Αξίζει να αναφερθεί ότι η πτήση των συστημάτων αυτών μπορεί να είναι είτε αυτόνομη, είτε τηλεκατευθυνόμενη από χειριστή στο έδαφος. Τα οχήματα αυτά είναι διαφόρων τύπων, μπαλόνια, αεροπλάνα, ελικόπτερα και τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται και τα πολυκόπτερα. Τα τελευταία είναι μια εναλλακτική μορφή των συμβατικών ελικοπτέρων με την διαφορά ότι υπάρχουν περισσότεροι και μικρότερου μεγέθους έλικες.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται σύντομη ιστορική αναδρομή στα συστήματα αυτά, ενώ παρουσιάζονται και χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής τους διεθνώς για μη στρατιωτικές εφαρμογές. Επίσης παρουσιάζεται η νομοθεσία που διέπει τη λειτουργία συστημάτων UAV ενώ το Κεφάλαιο 4 ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της έρευνας αγοράς που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας προκειμένου να αξιολογηθούν από τεχνοοικονομικής άποψης τα διαθέσιμα στο εμπόριο έτοιμα συστήματα UAVs.

## 4.1 Ιστορική αναδρομή

*Μπαλόνια*

Οι αδελφοί Montgolfier από τη Γαλλία, ήταν οι πρώτοι που πειραματίστηκαν με ιπτάμενα μπαλόνια το 1782. Επίσης κατά την διάρκεια του Αμερικάνικου εμφυλίου πολέμου (1861 – 1865), η Βόρεια Ένωση τοποθέτησε εμπρηστικούς μηχανισμούς σε μη επανδρωμένα μπαλόνια παρατήρησης με σκοπό την πυρπόληση περιοχών στις γραμμές μάχης. Γενικά, ήταν πάρα πολλές οι περιπτώσεις όπου τα μπαλόνια χρησιμοποιήθηκαν σε περιόδους πολέμου, εξοπλίζοντάς τα με όπλα ή βόμβες.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποίησαν μπαλόνια σε μεγάλο ύψος για την πρόγνωση καιρού στις αρχές της δεκαετίας του 1950, τα οποία ήτα εξοπλισμένα με κάμερες όπου είχε προγραμματιστεί να καταγράψει ευρεία γωνία θέασης της Σοβιετικής Ένωσης.

Το 1970 ο Whittlesey, χρησιμοποίησε ένα εξαρτημένο από το έδαφος μπαλόνι σε αρχαιολογικές παρατηρήσεις. Για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν ποικίλες κάμερες. Το ωφέλιμο φορτίο της κατασκευής ήταν 2,7 kg και το μπαλόνι μπορούσε να πετάξει σε ύψος έως και 600 m πάνω από το έδαφος (Eisenbeiss, 2009).

*Αεροπλάνα*

Τα πρώτα μη επανδρωμένα τηλεκατευθυνόμενα συστήματα αναπτύχθηκαν λίγο μετά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο. Τα πρώτα συστήματα που αναπτύχθηκαν ήταν ιπτάμενοι στόχοι (target drones) και εξελίχθηκαν από τις Η.Π.Α και το Ηνωμένο Βασίλειο, το 1930. (Azom.com Staff Writers, 2013)

Τα πρώτα UAV που αναπτύχθηκαν για επιτήρηση δεν χρησιμοποιήθηκαν παρά μόνο μετά το τέλος του πολέμου του Βιετνάμ. Αρχικά τα οχήματα αυτά ήταν εξοπλισμένα με απλές κάμερες, ενώ αργότερα χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός μετάδοσης εικόνας, θερμικές κάμερες και επιπλέον ηλεκτρονικά συστήματα (Azom.com Staff Writers, 2013).

Επίσης το 1930, το Βρετανικό Βασιλικό Ναυτικό ανέπτυξε το Qeen – Bee, το οποίο μπορούσε να επιχειρήσει με ταχύτητες 100 MPH (160 km/h). Ενώ κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι Ναζί ανέπτυξαν μια πλατφόρμα, η οποία μπορούσε να φτάσει ταχύτητες περίπου 500 MPH (804 km/h), ικανό να μεταφέρει 907 kg με αυτονομία 150 miles (241 km) (HowStuffWorks.com, 2014).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές του 1980, η ισραηλινή πολεμική αεροπορία χρησιμοποιεί μη επανδρωμένα εναέρια μέσα στον πόλεμο. Από τότε τα UAV παίζουν κρίσιμο ρόλο στις στρατιωτικές επιχειρήσεις των ΗΠΑ και όχι μόνο, και συνεχίζουν να επεκτείνονται καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων αποστολής (Azom.com Staff Writers, 2013).

*Ελικόπτερα*

Το 1980 ο Wester – Ebbinghaus, χρησιμοποίησε μη επανδρωμένο ιπτάμενο όχημα με περιστρεφόμενα πτερύγια για φωτογραμμετικούς σκοπούς. Πιο συγκεκριμένα, ήταν ένα ελικόπτερο Schluter με δυνατότητα ωφέλιμου φορτίου 3 kg. Το ελικόπτερο μπορούσε να πετάξει από 10 m – 100 m και ήταν εξοπλισμένο με φωτογραφική μηχανή Rolleiflex SLX. Στο συγκεκριμένο ελικόπτερο για να αντισταθμιστούν οι δονήσεις που προέρχονταν από τον κινητήρα, εγκαταστάθηκαν τοιχώματα πολυστυρολίου. Για την πτήση του εν λόγο ελικοπτέρου απαιτούνταν ένας πιλότος στο έδαφος, ο οποίος ήλεγχε την απογείωση και προσγείωση και ένας πλοηγός που είχε τον έλεγχο του ύψους και την ενεργοποίηση του κλείστρου της κάμερας, χειροκίνητα μέσω ραδιοζεύξης. (Eisenbeiss, 2009).

Ακολουθεί πίνακας με την παγκόσμια πρόβλεψη συνολικής δαπάνης για την εξέλιξη των UAVs.

| ($Millions) | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R&D | 1,030.0 | 1,130.0 | 1,450.0 | 1,720.0 | 1,810.0 | 2,190.0 | 2,450.0 | 2,525.0 | 3,570.0 | 3,805.0 | 21,680.0 |
| Production | 1,408.2 | 1,356.4 | 1,447.5 | 2,024.4 | 3,131.9 | 3,344.3 | 3,889.9 | 4,066.3 | 3,472.2 | 3,791.7 | 27,932.8 |
| O&M | 340.0 | 385.0 | 475.0 | 405.0 | 435.0 | 445.0 | 500.0 | 580.0 | 660.0 | 740.0 | 4965.0 |
| **Total** | **2,778.2** | **2871.4** | **3,372.5** | **4,149.4** | **5,376.9** | **5,979.3** | **6,839.9** | **7,171.3** | **7,702.2** | **8,336.7** | **54,577.8** |

| (R&D, $Millions) | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| USA | 850.0 | 900.0 | 1,200.0 | 1,400.0 | 1,300.0 | 1,600.0 | 1,800.0 | 1,800.0 | 2,800.0 | 3,000.0 | 16,650.0 |
| Rest of World | 180.0 | 230.0 | 250.0 | 320.0 | 510.0 | 590.0 | 650.0 | 725.0 | 770.0 | 805.0 | 5,030.0 |
| **Total** | **1,030.0** | **1,130.0** | **1,450.0** | **1,720.0** | **1,810.0** | **2,190.0** | **2,450.0** | **2,525.0** | **3,570.0** | **3,805.0** | **21,680.0** |

| (Procurement, $Millions) | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| USA | 1,085.0 | 895.0 | 1,055.0 | 1,565.0 | 2,105.0 | 1,845.0 | 2,255.0 | 2,625.0 | 2,185.0 | 2,445.0 | 18,060.0 |
| Rest of World | 323.2 | 461.4 | 392.5 | 459.4 | 1,026.9 | 1,499.3 | 1,634.9 | 1,441.3 | 1,287.2 | 1,346.7 | 9,872.8 |
| **Total** | **1,408.2** | **1,356.4** | **1,447.5** | **2,024.4** | **3,131.9** | **3,344.3** | **3,889.9** | **4,066.3** | **3,472.2** | **3,791.7** | **27,932.8** |

| (O&M, $Millions) | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| USA | 240.0 | 275.0 | 340.0 | 265.0 | 290.0 | 300.0 | 335.0 | 370.0 | 400.0 | 440.0 | 3,255.0 |
| Rest of World | 100.0 | 110.0 | 135.0 | 140.0 | 145.0 | 145.0 | 165.0 | 210.0 | 260.0 | 300.0 | 1,710.0 |
| **Total** | **340.0** | **385.0** | **475.0** | **405.0** | **435.0** | **445.0** | **500.0** | **580.0** | **660.0** | **740.0** | **4,965.0** |

Σχήμα 4.1: Παγκόσμια πρόβλεψη συνολικών δαπανών για την εξέλιξη των UAVs (Πηγή: Azom.com Staff Writers, 2013).

## 4.2 Πλεονεκτήματα των μη επανδρωμένων εναέριων μέσων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα μέσα γνωρίζουν μεγάλη άνθιση τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα κανονικά εναέρια μέσα. Κάποια από αυτά είναι τα παρακάτω:

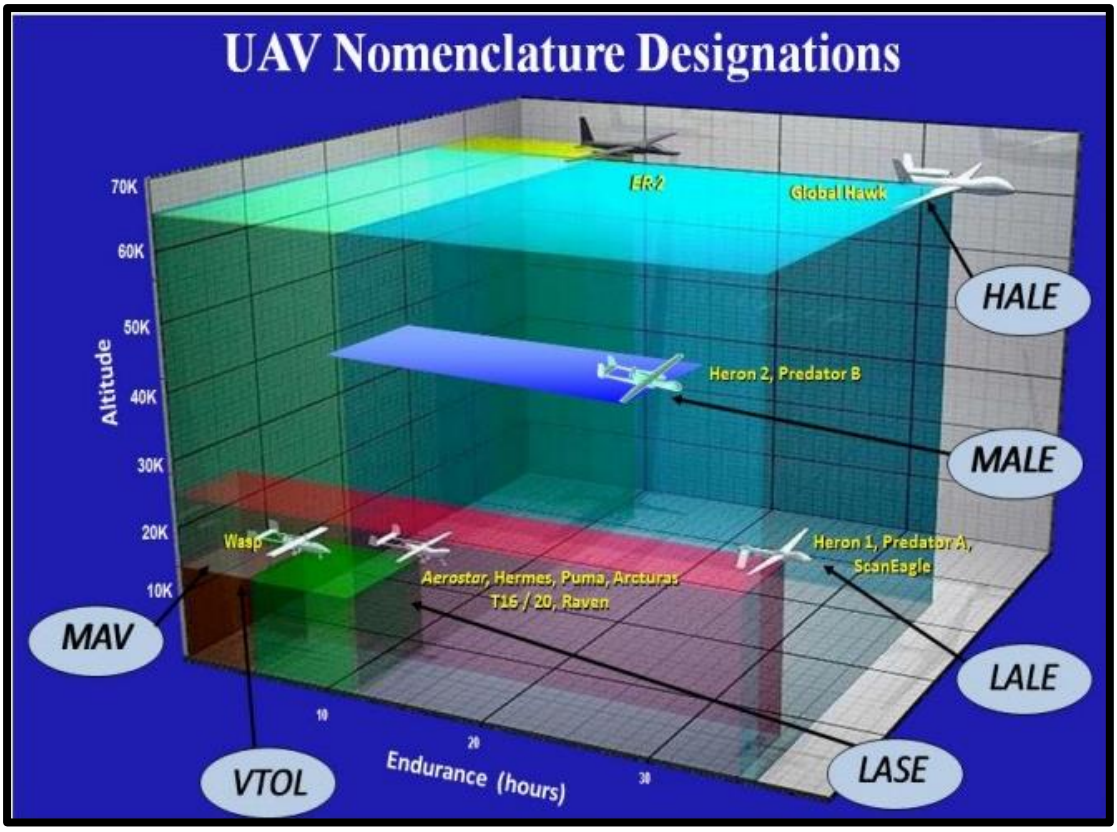
- Χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης.
- Μπορούν να επιχειρήσουν οπουδήποτε και με οποιεσδήποτε συνθήκες χωρίς τον κίνδυνο του ανθρώπινου παράγοντα.
- Με την εξέλιξη της τεχνολογίας μπορούν να προσομοιώσουν τα χαρακτηριστικά των επανδρωμένων (full size) αεροσκαφών, για παράδειγμα ταχύτητες 800 km/h και ύψος πτήσης 10.000 ft και πάνω.
- Μπορούν να εξοπλιστούν με διάφορες συσκευές, ανάλογα με την χρήση τους.

## 4.2 Κατηγορίες μη επανδρωμένων ιπτάμενων συστημάτων UAS

Η ταξινόμηση των πλατφόρμων UAS που χρησιμοποιούνται ευρέως για επιστημονικές χρήσεις γίνεται με βάση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος, την αυτονομία και τις δυνατότητες. Έτσι η γενικά αποδεκτή ονοματολογία στην πολιτική αεροπορία είναι η παρακάτω (Watts et al., 2012):

- **MAV (Micro (or Miniature) or NAV (Nano) Air Vehicles):** Ονομάζονται έτσι λόγω του μεγέθους τους και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε στρατιωτικές εφαρμογές. Τα αεροσκάφη αυτά πετούν σε πολύ χαμηλά υψόμετρα (<330 m) και ο περιορισμένος τους χώρος οδηγεί σε πολύ σύντομους χρόνους πτήσης (5 – 30 min).

- **VTOL (Vertical Take-Off & Landing):** Τα αεροσκάφη αυτά δεν απαιτούν διάδρομο απογείωσης ή προσγείωσης και έτσι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι περιορισμοί του εδάφους απαιτούν την συγκεκριμένη δυνατότητα. Το ύψος πτήσης των οχημάτων αυτών μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το προφίλ της εκάστοτε αποστολής, αλλά γενικά πετούν σε χαμηλά υψόμετρα. Οι αυξημένες απαιτήσεις ισχύος για την αιώρηση περιορίζει την διάρκεια της πτήσης για τα VTOLs, εκτός από τα μεγαλύτερα μεγέθη όπου αυξάνεται και η χωρητικότητα καυσίμου με συνέπεια την μεγαλύτερη αυτονομία.
- **LASE (Low Altitude, Short-Endurance):** Συστήματα γνωστά και ως sUAS, small unmanned aircraft systems. Τα συστήματα αυτά μηδενίζουν την ανάγκη για διάδρομο απογείωσης και προσγείωσης ενώ έχουν βελτιστοποιηθεί για την εύκολη μεταφορά, ανάπτυξη και ανάκτηση. Η μάζα των αεροσκαφών αυτών είναι περίπου 2 – 5 kg με άνοιγμα φτερών < 3 m, έτσι επιτρέπεται η απογείωση από μικρά συστήματα καταπελτών, ή από το χέρι. Η συσχέτιση της μάζας και των ικανοτήτων τους συνήθως μειώνουν την αυτονομία και το εύρος τηλεπικοινωνίας σε 1 – 2 ώρες ή μετά από μερικά km από τους σταθμούς εδάφους.
- **LASE Close:** Αυτή η κατηγορία περιγράφει μικρά συστήματα UAS των οποίων τα αεροπλάνα χρειάζονται διαδρόμους απογείωσης / προσγείωσης αλλά εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους τους έχουν αυξημένες δυνατότητες. Τα συστήματα αυτά μπορούν να επιχειρήσουν σε ύψος πτήσης περίπου 1.500 m και μπορούν να παραμείνουν ψηλά για πολλές ώρες
- **LALE (Low Altitude, Long Endurance):** Τα αεροσκάφη αυτά αποτελούν την συνέχεια των sUAS, σχεδιασμένα από τις Ηνωμένες Πολιτείες και την FAA (Federal Aviation Administration). Τα συστήματα αυτά μπορούν να μεταφέρουν φορτίο αρκετών kg, σε ύψος μερικών χιλιάδων m και για παρατεταμένες περιόδους.
- **MALE (Medium Altitude, Long Endurance):** Το αεροσκάφος αυτό συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερο από τις κατηγορίες χαμηλού ύψους UAVs, μπορεί να επιχειρήσει σε υψόμετρο περίπου 9.000 m, σε πτήσεις εμβέλειας εκατοντάδων km από τους σταθμούς εδάφους και με αυτονομία πολλών ωρών.
- **HALE (High Altitude, Long Endurance):** Πρόκειται για το μεγαλύτερο και πιο περίπλοκο από τα UAS, με αεροσκάφη που είναι μεγαλύτερα από της γενικής αεροπορίας επανδρωμένα αεροπλάνα. Τα UAVs αυτά μπορούν να πετάξουν σε ύψος 20.000 m ή περισσότερο σε αποστολές που εκτείνονται χιλιάδες km. Μερικά HALE αεροσκάφη έχουν διάρκεια πτήσης πάνω από 30 ώρες και έχουν θέσει τα ρεκόρ όσον αφορά το ύψος και τη διάρκεια πτήσης.




Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της ονοματολογίας των UAVs σύμφωνα με το Αμερικάνικο Υπουργείο Εσωτερικής Ασφάλειας (Πηγή: Watts et al., 2012).

## 4.2 Μη στρατιωτικές εφαρμογές UAV

Από την προηγούμενη (4.1) ενότητα αλλά και το Κεφάλαιο 3 διαπιστώνει ο αναγνώστης, πως σχεδόν το σύνολο των εφαρμογών της Τηλεπισκόπησης, στις γεωεπιστήμες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων. Οι επόμενες παράγραφοι παρουσιάζουν ενδεικτικές, μη στρατιωτικές εφαρμογές των συστημάτων αυτών.

### 4.2.1 Μεταφορά αγαθών (Transport)

Με τα οχήματα αυτά μπορούν να γίνουν διάφορες μεταφορές υλικών αγαθών σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, για παράδειγμα φαρμάκων ή τροφίμων σε περιπτώσεις πολέμου.

Επίσης, τον Δεκέμβριο του 2013, η εταιρεία Amazon ανακοίνωσε ότι εξετάζει τη δυνατότητα εφαρμογής πολυκόπτερων για την παράδοση πακέτων που ζυγίζουν μέχρι 2,3 kg, ενώ παρόμοιες ανακοινώσεις έχουν γίνει και από μικρότερου μεγέθους εταιρείες.

Η παραπάνω εφαρμογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη και σε κράτη όπως τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, τα οποία χαρακτηρίζονται από αχανείς εκτάσεις ερήμου και τα οποία προγραμματίζουν να παραδίδουν κρατικά έγγραφα μέσω συστημάτων UAV.

### 4.2.2 Έρευνα και Διάσωση (Search and Rescue)

Την τελευταία δεκαετία έχει μεγιστοποιηθεί η εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε πτήσεις έρευνας και διάσωσης. Αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν κατά την διάρκεια π.χ. έντονων φυσικών καταστροφών ή κατά την αναζήτηση ανθρώπων που έχουν χαθεί (για παράδειγμα ορειβάτες σε βουνά και ορεινούς όγκους, ή ψαράδες στη θάλασσα). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν θερμικές είτε οπτικές κάμερες. Ακολουθεί μια εικόνα στο θερμικό φάσμα δύο ανθρώπων, που λήφθηκε από το εξακόπτερο της παρούσας διπλωματικής από ύψος περίπου 10 m, για την κατανόηση της πολύτιμης συμβολής τους σε εφαρμογές έρευνας και διάσωσης (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Εικόνες αποτύπωσης ανθρώπων στο θερμικό υπέρυθρο.

### 4.2.3 Πυρανίχνευση (Fire Detection)

Πτήσεις πυρανίχνευσης μπορούν να υλοποιηθούν από συστήματα UAVs. Τη δεδομένη στιγμή πραγματοποιούνται τέτοιες πτήσεις από κανονικά αεροπλάνα ή ελικόπτερα σε ζώνες υψηλού κινδύνου, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Τα UAVs μπορούν να εμπλακούν σε τέτοιες εφαρμογές, χρησιμοποιώντας θερμικές κάμερες, οι οποίες μπορούν να εντοπίσουν με αυτοματοποιημένη διαδικασία τις περιοχές του εδάφους με τις αυξημένες θερμοκρασίες και να αποτελέσουν πρόληψη για μεγάλο μέρος πυρκαγιών (Casbeer et al., 2005).

### 4.2.4 Αρχαιολογία (Archaeology)

Στην αρχαιολογία, επίσης μπορούν να εμπλακούν τα οχήματα αυτά, είτε πραγματοποιώντας φωτογραμμετρικές εναέριες έρευνες για μεγάλης κλίμακας χαρτογραφήσεις σε Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς (GIS) (Bendea et al., 2007), είτε χρησιμοποιώντας ειδικούς αισθητήρες να εφαρμοστούν γεωφυσικές μέθοδοι (geophysical methods) για την ανεύρεση θαμμένων αρχαιοτήτων.

### 4.2.5 Εφαρμογές Μηχανικού Ορυκτών Πόρων

Συστήματα UAVs μπορούν, και έχουν, χρησιμοποιηθεί για πληθώρα εφαρμογών σχετικών με την επιστήμη του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων. Μερικές από αυτές ενδεικτικά είναι:

- Ανίχνευση ορυκτών πόρων.
- Παρακολούθηση ευστάθειας πρανών.
- Τοπογραφικές αποτυπώσεις ορυχείων.

Η Γερμανική εταιρεία Aibotix GmbH έχει αναπτύξει ένα UAV, πάνω στο αντικείμενο του Μηχανικού ορυκτών πόρων. Συγκεκριμένα, είναι ένα εξακόπτερο το οποίο σχεδιάστηκε για να προσφέρει τις υπηρεσίες του σε μεταλλεία, φράγματα και άλλες παρόμοιου τύπου εφαρμογές. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του γερμανικού προϊόντος (Πηγή: Aibotix GmbH, 2014).

| **Τύπος μοντέλου** | **Εξακόπτερο** |
|---|---|
| Διαστάσεις (διάμετρος, ύψος) | 103 cm, 45 cm |
| Υλικό κατασκευής | Ανθρακόνημα (carbon) |
| Μάζα | 3.400 gr |
| Διάρκεια πτήσης | 30 min (εξαρτάται από τη μάζα) |
| Αισθητήρες | GPS, Gyroscope, ultrasonic sensors, camera |
| Μπαταρία | Λιθίου Πολυμερούς 5.000 - 10.000 mAh |

Στην φωτογραφία που ακολουθεί (Σχήμα 4.4) φαίνεται να κάνει επίδειξη δυνατοτήτων σε ένα υπαίθριο ορυχείο. Το κόστος του βασικού πακέτου του προϊόντος αυτού είναι 33.000 Ευρώ και αυτά που προσφέρει είναι τα εξής :

- Ανάλυση των βαθμίδων του ορυχείου (slope analysis).
- Υπολογισμός εμβαδού και όγκου διαφόρων σημείων του ορυχείου (για παράδειγμα ογκομέτρηση ενός αναχώματος ή ενός πρανούς).
- Αυτόματη δημιουργία ισοϋψών καμπυλών σε ολόκληρο το ορυχείο.
- Δημιουργία μοντέλου τριών διαστάσεων (3-D Analysis).




Σχήμα 4.4: Το εξακόπτερο της Γερμανικής εταιρείας κατά την διάρκεια πτήσης σε υπαίθριο ορυχείο (Πηγή: Aibotix GmbH, 2014).

Σημαντική είναι, όπως φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία (Σχήμα 4.5), η προσφορά του ίδιου προϊόντος στα φράγματα όπως αναφέρει η κατασκευάστρια εταιρεία δίνοντας ολοκληρωμένες λύσεις στα παρακάτω πεδία :

- Ολοκληρωτικός οπτικός έλεγχος σε όλη την επιφάνεια του φράγματος.
- Γρήγορη και ασφαλή λύση καθώς δεν χρειάζονται σκαλωσιές με τον κίνδυνο ανθρώπινου ατυχήματος.
- Όλες οι εικόνες είναι γεωαναφερμένες σε σύστημα συντεταγμένων.
- Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου της περιοχής (3-D Analysis).




Σχήμα 4.5: Το εξακόπτερο της Γερμανικής εταιρείας κατά την πτήση επιθεώρησης σε φράγμα (Πηγή: Aibotix GmbH, 2014).

## 4.3 Νομοθεσία των UAV και των αερομοντέλων

Η Ελληνική νομοθεσία σχετικά με τον αερομοντελισμό και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα καλύπτεται από το Νόμο (1127/72) περί «Ιδιωτικής Αεροπορίας» (Φ.Ε.Κ 9, 13 Ιανουαρίου 2010). Στην κείμενη νομοθεσία χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι όροι:

- Αερομοντέλο ή Μοντέλο Αεροσκάφους (Model Aircraft) είναι μία ιπτάμενη συσκευή περιορισμένων διαστάσεων, που φέρει ή όχι προωθητικό σύστημα, που δεν έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο χρησιμοποιείται για αεραθλητισμό ή ψυχαγωγία. Τα αερομοντέλα μπορεί να έχουν τη μορφή αεροπλάνου, ανεμοπτέρου, ελικόπτερου, αυτόγυρου, υδροπλάνου, αμφίβιου, αλεξίπτωτου, αερόστατου, αερόπλοιου, ή άλλης μορφής. Τα αερομοντέλα μπορεί να είναι τηλεχειριζόμενα, ελεύθερης πτήσης, ή κυκλικής πτήσης.
- Μη επανδρωμένο αεροναυτικό όχημα (UAV − Unmanned Aeronautical Vehicle) είναι μία ιπτάμενη συσκευή που δεν μεταφέρει άνθρωπο, και το οποίο έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται για επιστημονικούς, ερευνητικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς. Τα UAV δεν θεωρούνται αερομοντέλα, και τα αερομοντέλα δεν θεωρούνται UAV.

Στην παραπάνω νομοθεσία, επίσης διακρίνονται οι κατηγορίες των αερομοντέλων ανάλογα με τη μάζα τους, αναφέρονται οι γενικές προδιαγραφές που πρέπει αυτά να έχουν, καθώς και τους

περιορισμούς τόσο σε τεχνικό όσο και σε πτητικό επίπεδο. Τέλος κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν οι προϋποθέσεις απαγόρευσης των πτήσεων των αερομοντέλων.

Δεν επιτρέπονται πτήσεις αερομοντέλων χωρίς άδεια από την αρμόδια αρχή (Υ.Π.Α[3]):

- σε απαγορευμένες, περιορισμένες, επικίνδυνες και δεσμευμένες περιοχές όπως αυτές αναφέρονται στις πάσης φύσεως αεροναυτικές εκδόσεις της Υ.Π.Α.
- σε ύψος μεγαλύτερο των 400 ft από την επιφάνεια του εδάφους.
- σε απόσταση μικρότερη των 3 km από ελεγχόμενο αεροδρόμιο.
- εντός πολιτικών ή στρατιωτικών αεροδρομίων.
- άνωθεν, πλησίον ή εντός στρατιωτικών εγκαταστάσεων.
- άνωθεν η πλησίον κατοικημένων περιοχών.
- άνωθεν η πλησίον εγκαταστάσεων κοινής ωφέλειας.
- άνωθεν η πλησίον αρχαιολογικών χώρων.

## 4.4 Έρευνα αγοράς έτοιμου συστήματος UAV

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μια έρευνα αγοράς σχετικά με τα έτοιμα συστήματα UAV, με σκοπό να συγκριθεί το κόστος και τα χαρακτηριστικά των έτοιμων συστημάτων με αυτά ενός πρότυπου συστήματος.

### 4.4.1 Απαιτήσεις συστήματος UAV

Στις προηγούμενες ενότητες (4.1 – 4.3) παρουσιάστηκαν οι διάφοροι τύποι UAV ανάλογα με το είδος τους (π.χ. μπαλόνια, αεροπλάνα, ελικόπτερα, πολυκόπτερα), το ύψος πτήσης τους κ.α. αλλά και η πληθώρα εφαρμογών στα οποία έχουν ή/και πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις απαιτήσεις που έχει ο χρήστης ενός τέτοιου συστήματος διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό και οι διαθέσιμες επιλογές.

Για την υλοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας τέθηκαν σε συνεργασία με τον Επιβλέποντα Καθηγητή αυτής, οι προϋποθέσεις τις οποίες θα πρέπει το υπο ανάπτυξη/προμήθεια σύστημα UAV να πληρεί:

- Κόστος. Το κόστος ολόκληρου του συστήματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1.000 – 1.500 Ευρώ.
- Χρόνος πτήσης. Ο χρόνος πτήσης πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 10 λεπτά.
- Ωφέλιμο φορτίο (Payload). Το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να φέρει εξοπλισμό καταγραφής εικόνας συνολικής μάζας μέχρι 1.5 kg.

[3] Υ.Π.Α.: Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας

- Δυνατότητα τροποποίησης. Το σύστημα θα πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα επέμβασης τόσο σε επίπεδο υλικών (hardware) όσο και σε επίπεδο λογισμικού (open source software), καθώς πρόκειται να παραμείνει στο Εργαστήριο Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής με σκοπό να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές.

### 4.4.2 Διαθέσιμες επιλογές εμπορικών συστημάτων UAV

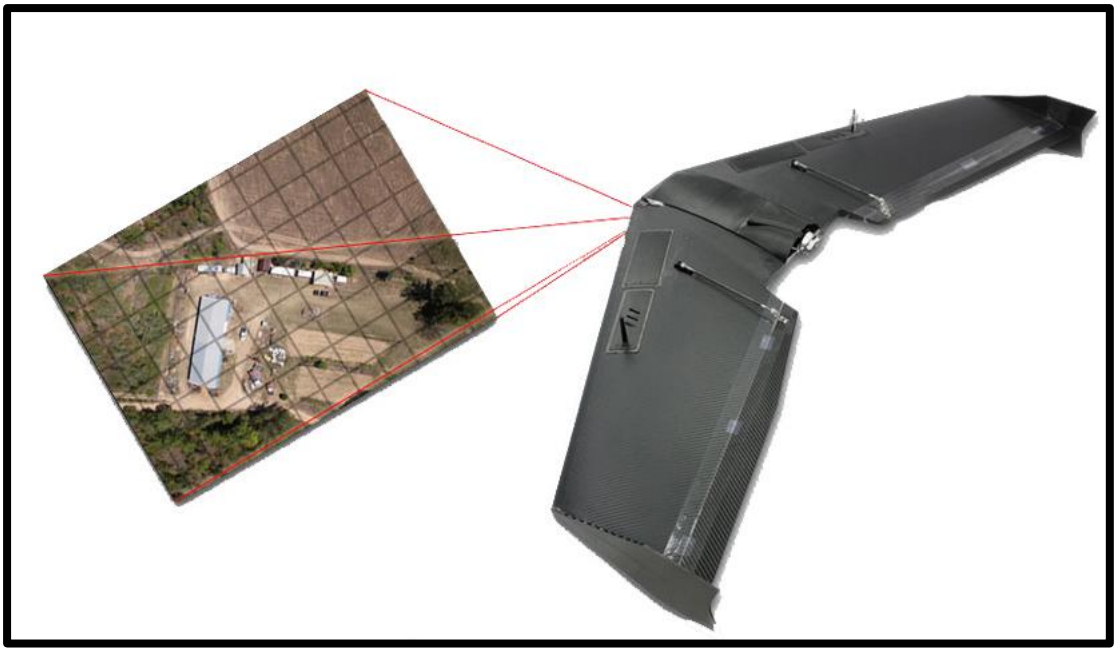
Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν ενδεικτικά μερικές από τις διαθέσιμες επιλογές όπως αυτές προέκυψαν από την έρευνα αγοράς που αναφέρθηκε παραπάνω.

*1η επιλογή*

Η Αμερικάνικη εταιρεία Marcus UAV inc, διαθέτει στην αγορά την σειρά μη επανδρωμένων αεροσκαφών Zephyr. Τα αεροσκάφη αυτά μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες επιτήρησης, αεροφωτογραφίας, εξερεύνησης και πλήθος άλλων εφαρμογών. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά τα τεχνικά της χαρακτηριστικά (Πίνακας 4.2), καθώς και φωτογραφία από την κατασκευάστρια εταιρεία (Σχήμα 4.6).

Πίνακας 4.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αμερικάνικου προϊόντος (Πηγή: Marcus UAV corp., 2013).

| **Τύπος μοντέλου** | **Αεροπλάνο** |
|---|---|
| Διαστάσεις (άνοιγμα φτερών) | 137 cm |
| Μάζα | 1.800 gr |
| Μέγιστη ωφέλιμη μάζα | 1.000 gr |
| Μέγιστη ταχύτητα | 48 – 144 km/h |
| Μέγιστος άνεμος επιχείρησης | 64 km/h |
| Διάρκεια πτήσης | 60 min (εξαρτάται από τη μάζα) |
| Εμβέλεια | 40 km |
| Αισθητήρες | GPS, Gyroscope, camera |
| Κόστος | 17.000 Δολάρια |



Σχήμα 4.6: Εικόνα του αμερικάνικου μη επανδρωμένου αεροσκάφους (Πηγή: Marcus UAV corp., 2013).

*2η επιλογή*

Η δεύτερη επιλογή περιλαμβάνει ένα UAV τύπου εξακόπτερου, από γνωστό εμπορικό ελληνικό κατάστημα. Η ποιότητα της επιλογής αυτής είναι αρκετά υψηλή και αποτελεί την έτοιμη λύση για πολλές εφαρμογές αεροφωτογραφιών και βιντεοσκοπήσεις από αέρος. Παρακάτω αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επιλογής αυτής (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξακόπτερου της δεύτερης επιλογής.

| **Επιλογή 2η** | |
|---|---|
| Τύπος μοντέλου | Εξακόπτερο |
| Διαστάσεις (διάμετρος, ύψος) | 800 mm, 350 mm |
| Υλικό κατασκευής | Ανθρακόνημα (carbon) |
| Μάζα | 5.000 – 7.000 gr |
| Μέγιστη ωφέλιμη μάζα | 0 – 2.500 gr |
| Μέγιστη κατανάλωση | 2.100 watt |
| Διάρκεια πτήσης | 16 min (εξαρτάται από τη μάζα) |
| Αισθητήρες | GPS, Gyroscope, Brushless camera gimbal |
| Μπαταρία | Λιθίου Πολυμερούς 22.2 Volt 10.000 – 16.000 mAh |
| Κόστος | 8.000 Ευρώ |

*3η επιλογή*

Η Τρίτη επιλογή περιλαμβάνει επίσης ένα σύστημα εξακόπτερου από εμπορικό κατάστημα της Ελλάδας. Το εξακόπτερο αυτό αποτελεί μια οικονομικότερη λύση, όμοια με την προηγούμενη

και έχει επίσης αναπτυχθεί για επαγγελματίες του χώρου των αεροφωτογραφίσεων και των βιντεολήψεων (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξακόπτερου της τρίτης επιλογής.

| **Επιλογή 3η** | |
|---|---|
| Τύπος μοντέλου | Εξακόπτερο |
| Διαστάσεις (διάμετρος, ύψος) | 900 mm, 200 mm |
| Υλικό κατασκευής | Ανθρακόνημα (carbon), Αλουμίνιο |
| Μάζα | 4.000 – 6.000 gr |
| Μέγιστη ωφέλιμη μάζα | 0 – 2.000 gr |
| Μέγιστη κατανάλωση | 700 watt |
| Διάρκεια πτήσης | 16 min (εξαρτάται από τη μάζα) |
| Αισθητήρες | GPS, Gyroscope, Brushless camera gimbal |
| Μπαταρία | Λιθίου Πολυμερούς 18.5 Volt 10.000 – 16.000 mAh |
| Κόστος | 5.700 Ευρώ |

### 4.4.3 Αξιολόγηση μη επανδρωμένων συστημάτων

Κατά την έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε, εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα παραπάνω συστήματα καθώς και άλλα πολλά διαφόρων εταιρειών. Στην προηγούμενη παράγραφο παρατέθηκαν μερικά αυτά που αποτελούσαν τις επικρατέστερες λύσεις, με βάση τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και τις τεχνικές προδιαγραφές, που τέθηκαν στην παράγραφο 4.3.1.

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη για να ανταγωνιστούν τα ελικόπτερα ή πολυκόπτερα στο ωφέλιμο φορτίο που μπορούν να μεταφέρουν (payload), θα πρέπει να αυξηθεί σημαντικά το μέγεθός τους, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνουν οι παράγοντες όπως μεταφορά και διάδρομος απογείωσης / προσγείωσης. Επιπλέον αξιολογώντας την επιλογή του Αμερικάνου προϊόντος (αεροσκάφους) συμπεραίνεται ότι είναι δύσκολη η τροποποίηση ολόκληρης της κατασκευής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής διαφορετικού εξοπλισμού από αυτόν που προτείνει ο κατασκευαστής. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η επιλογή του αεροσκάφους υστερεί σε σχέση με τα οχήματα κάθετης από/προσγείωσης για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Έτσι λοιπόν η πρώτη επιλογή που αναφέρθηκε παραπάνω τίθεται εκτός προδιαγραφών, λαμβάνοντας βέβαια υπ’ όψιν το απαγορευτικό του κόστος.

Εξετάζοντας τις δυο άλλες επιλογές των εξακόπτερων (1η και 2η επιλογή) αρχικά παρατηρείται το αρκετά υψηλό τους κόστος (>5000 Ευρώ). Επιπροσθέτως, αξιολογώντας τον αυτόματο πιλότο των συστημάτων αυτών διαπιστώθηκε πως δεν είναι ανοιχτού κώδικα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του λογισμικού του από τον χρήστη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω (Ενότητα 4.4.1), η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι απαραίτητη τεχνική

προδιαγραφή για την αγορά του UAV. Λαμβάνοντας υπόψιν λοιπόν το υψηλό τους κόστος σε συνδυασμό με την μη δυνατότητα τροποποίησης του λογισμικού τους τίθενται εκτός προδιαγραφών και οι συγκεκριμένες επιλογές για την εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανωτέρω αξιολόγησης αποφασίστηκε η κατασκευή πρότυπου μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος, με την αγορά ξεχωριστών κομματιών (components), όπου το κόστος θα περιοριζόταν στα 1.000 – 1.500 Ευρώ, διατηρώντας βέβαια την αξιοπιστία του οχήματος σε υψηλά επίπεδο όμοια με αυτά των έτοιμων συστημάτων. Η απόφαση αυτή ελήφθη σε συνεργασία με τον Επιβλέποντα Καθηγητή λαμβάνοντας υπ' όψιν και το γεγονός της υπάρχουσας εμπειρίας σε κατασκευή και πλοήγηση παρόμοιων πλατφόρμων αλλά και της αξιοποίησης υφιστάμενου, ιδιωτικού, εξοπλισμού. Με τον τρόπο αυτό προσδίδεται σημαντική προστιθέμενη αξία καθώς το πρότυπο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα θα μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια και σε άλλες εφαρμογές στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Τέλος, αναφορικά με τον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί για τη καταγραφή, και στα πλαίσια αξιοποίησης υφιστάμενου εξοπλισμού συνολικά του Πολυτεχνείου Κρήτης αποφασίστηκε να αξιοποιηθεί η θερμική κάμερα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.

## 4.5 Συμπεράσματα

Η μελέτη της κείμενης νομοθεσίας ήταν απαραίτητη ώστε η παρούσα εργασία να πληροί τους κανόνες ασφαλείας πριν και κατά την διάρκεια της πτήσης. Για τον λόγο αυτό πριν από κάθε πτήση πραγματοποιούνταν οι απαραίτητες λίστες ελέγχου (checklists) (βλ. Πίνακα 6.1, Κεφάλαιο 6) και οι τεχνικοί έλεγχοι της πλατφόρμας. Κατά την διάρκεια των πτήσεων είχε εξασφαλιστεί ότι οι άνθρωποι ήταν σε ασφαλή απόσταση και ότι δεν υπήρχαν ζώα στην ευρύτερη περιοχή. Η διαδικασία της πτήσης περιγράφεται αναλυτικότερα σε στο Κεφάλαιο 6.

Από το Κεφάλαιο αυτό εξάγεται το συμπέρασμα πως το κόστος απόκτησης ενός έτοιμου μη επανδρωμένου εναέριου μέσου είναι απαγορευτικό για παρόμοιες μικρής κλίμακας εφαρμογές. Επιπρόσθετα (βλ. 4.4.3), το κόστος δεν είναι το μόνο που αποτελεί τροχοπέδη καθώς τα βιομηχανικού τύπου οχήματα στην πλειονότητά τους είναι μη τροποποιήσιμα. Επομένως, δεν υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής διαφορετικών συστημάτων εξοπλισμού και λογισμικού από τον χρήστη, όπως για παράδειγμα μικροϋπολογιστή, USB drive ή διαφορετική κάμερα από αυτή που προτείνει ο κατασκευαστής κ.α. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην λύση της πρότυπης κατασκευής μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος, έτσι ώστε να περιοριστεί όσο τον δυνατόν το κόστος της. Για το σκοπό αυτό (μείωση κόστους) αποφασίστηκε η αξιοποίηση υφιστάμενου

εξοπλισμού ενώ ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στο να υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στις εφαρμογές που η πρωτότυπη κατασκευή θα χρησιμοποιηθεί. Με βάση τα ανωτέρω στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια κατασκευής του πρωτότυπου μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

# Κεφάλαιο 5: Κατασκευή μη επανδρωμένου ιπτάμενου οχήματος

Στο Κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι βασικές τεχνικές λεπτομέρειες της κατασκευής, καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και επιλύθηκαν, ώστε να φτάσει η συγκεκριμένη πλατφόρμα στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Η κατασκευή έγινε με βάση τον υπάρχοντα εξοπλισμό και με βάση της ανάγκες της παρούσας διπλωματικής σε αυτονομία, συνολικό ωφέλιμο φορτίο (payload) και σύστημα αυτομάτου πιλότου.

## 5.1 Κατασκευή πλατφόρμας

Η πλατφόρμα που κατασκευάστηκε είναι τύπου πολυκόπτερου και συγκεκριμένα εξακόπτερου (rotary wing). Τα πολυκόπτερα είναι μια παραλλαγή του συμβατικού ελικοπτέρου με την διαφορά ότι υπάρχουν περισσότεροι και μικρότερου μεγέθους έλικες. Τα πολυκόπτερα διατηρούν ένα σταθερό προβάδισμα στην σταθερότητα, στην ευκολία χειρισμού και στη μάζα που μπορούν να μεταφέρουν (payload) σε σχέση με τα ελικόπτερα μονού στροφείου. Έτσι έγινε μελέτη για τα υλικά (components) που θα μας έδιναν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, τα οποία αφού αγοράστηκαν, συναρμολογήθηκαν και τελικά ρυθμίστηκαν με σκοπό την αποτελεσματική αλληλεπίδρασή και την ομαλή λειτουργία τους. Το συνολικό κόστος της κατασκευής δεν ξεπέρασε τα 1000 Ευρώ.

### 5.1.1 Υλικά κατασκευής πλατφόρμας

Τα υλικά της κατασκευής που επιλέχθηκαν, περιγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί. (Πίνακας 5.1). Η επιλογή έγινε συναρτήσει της ποιότητας και του κόστους αγοράς τους (value for money). Στον Πίνακα 5.2 περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την θερμική καταγραφή και τα υλικά που χρειάστηκαν για την λειτουργία της.

Πίνακας 5.1: Ποσότητα και περιγραφή κάθε υλικού του εξακόπτερου.

| **Ποσότητα** | **Περιγραφή** |
|---|---|
| 1 | Σκελετός (frame) εξακόπτερου με διαγώνια διάσταση 800 mm |
| 6 | Τριφασικοί ρότορες (brushless motors) ισχύος 500 Watt έκαστο με τάση λειτουργίας 11.1 – 14.8 Volt ικανά να γυρίσουν προπέλα 13X4 |
| 6 | Τριφασικοί ελεγκτές ταχύτητας (Electronic Speed Control) μέγιστης έντασης ρεύματος 30 Amper με τάση λειτουργίας 11.1 – 14.8 Volt |
| 1 | Σύστημα αυτομάτου πιλότου, μονάδα GPS και τηλεμετρία 433 MHz |
| 1 | Σύστημα προσγείωσης (landing gear) ύψους 200 mm |
| 1 | Βάση κάμερας (brushless camera gimbal) από ανθρακόνημα με ρότορες και πλακέτα |
| 2 | Μπαταρίες Λιθίου Πολυμερούς (Li-Po) 14.8 Volt χωρητικότητας 5000 mAh συνδεδεμένες παράλληλα (δηλαδή συνολικής χωρητικότητας 10000 mAh) |
| 6 | Έλικες 13 x 4 carbon fiber |

Πίνακας 5.2: Εξοπλισμός που απαιτήθηκε για την θερμική καταγραφή.

| **Ποσότητα** | **Περιγραφή** |
|---|---|
| 1 | Θερμική κάμερα Flir A315 (Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης) |
| 1 | Router δικτύου για την εκπομπή θερμικής εικόνας της κάμερας μέσω Wifi προς τον σταθμό βάσης |
| 1 | Access Point για την παραλαβή της θερμικής εικόνας μέσω Wifi στον σταθμό βάσης |
| 2 | Μπαταρία Λιθίου Πολυμερούς (Li-Po) 11,1 Volt χωρητικότητας 2200 mAh για την λειτουργία της κάμερας, της βάσης της κάμερας και του router εκπομπής του εξακόπτερου, το τελευταίο μέσω ενός regulator που μείωνε την τάση στα 5 Volt. |

### 5.1.2 Συναρμολόγηση σκελετού

Το πρώτο στάδιο της κατασκευής περιλάμβανε την συναρμολόγηση του σκελετού του εξακόπτερου (frame) (Σχήμα 5.1) και την τοποθέτηση των έξι μοτέρ πάνω στους βραχίονες του. Τα κομμάτια ήταν ξεχωριστά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να μην ταιριάζουν απόλυτα οι βάσεις των μοτέρ με τις υπάρχουσες τρύπες στους βραχίονες, οπότε διατρήθηκαν δυο άλλες τρύπες πάνω στον πλαστικό βραχίονα (Σχήμα 5.2). Ο βραχίονας βιδώθηκε ανάμεσα στην μεταλλική βάση και στο μοτέρ για καλύτερη σταθερότητα. Με την ολοκλήρωση και των έξι μοτέρ πάνω στους βραχίονες του εξακόπτερου σειρά είχε η συναρμολόγηση των βραχιόνων αυτών μεταξύ τους (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.1: Ο σκελετός (frame) και τα ποδαράκια (landing gear) στις συσκευασίες τους.



Σχήμα 5.2: Η μεταλλική βάση ως οδηγός για την διάτρηση των άλλων δυο τρυπών.




Σχήμα 5.3: Οι έξι βραχίονες έτοιμοι για την μεταξύ τους συναρμολόγηση.

### 5.1.3 Συναρμολόγηση συστήματος προσγείωσης

Το επόμενο στάδιο περιλάμβανε την συναρμολόγηση του συστήματος προσγείωσης (landing gear), το οποίο έπρεπε να βιδωθεί στον σκελετό (frame) του εξακόπτερου. Και στο σημείο αυτό διατρήθηκαν δυο νέες τρύπες πάνω στον σκελετό, λόγω της διαφορετικότητας των εξαρτημάτων. Τέλος τοποθετήθηκαν και δυο κομμάτια διογκωμένης πολυστερίνης (αφρολέξ) στα ποδαράκια του συστήματος προσγείωσης με σκοπό την απορρόφηση κραδασμών κατά την φάση της προσγείωσης. Επιλέχθηκε έντονος χρωματισμός (ροζ) με σκοπό τόσο την εμφανή διάκριση όσο και τον προσανατολισμό του εξακόπτερου κατά τη διάρκεια της πτήσης. (Σχήμα 5.4). Επισημαίνεται πως, αφού τελειοποιηθεί το εξακόπτερο και το σύστημα προσγείωσης, αποσυναρμολογούνται προκειμένου να αλειφθούν οι βίδες, μία προς μία, με ειδική κόλλα σπειρωμάτων και γίνεται επανασυναρμολόγηση του εξακόπτερου. Το στάδιο αυτό εξασφαλίζει την αποφυγή χαλάρωσης των βιδών από τους κραδασμούς της πλατφόρμας κατά τη διάρκεια της πτήσης.



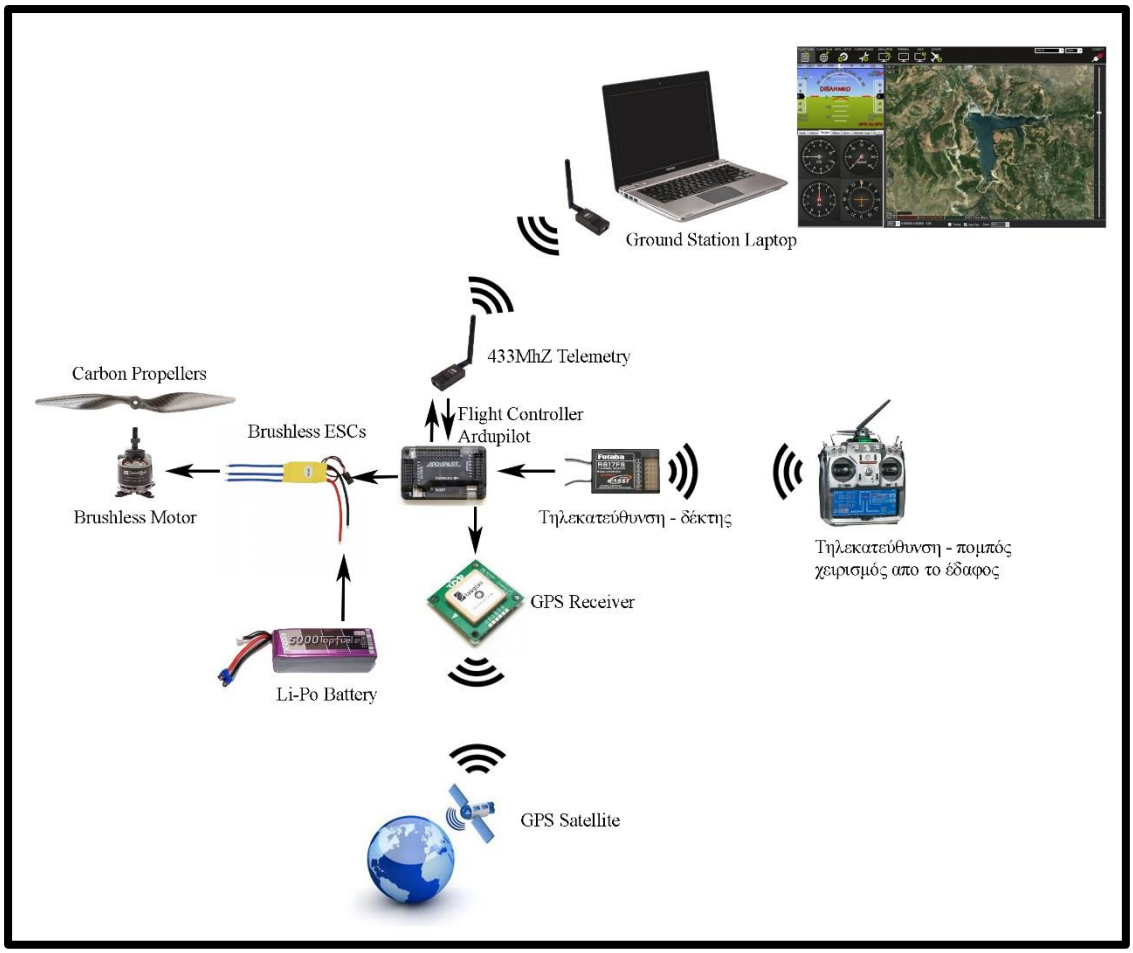
Σχήμα 5.4: Το εξακόπτερο μετά την συναρμολόγησή του.

### 5.1.4 Κατασκευή καλωδιώσεων – συνδέσεις

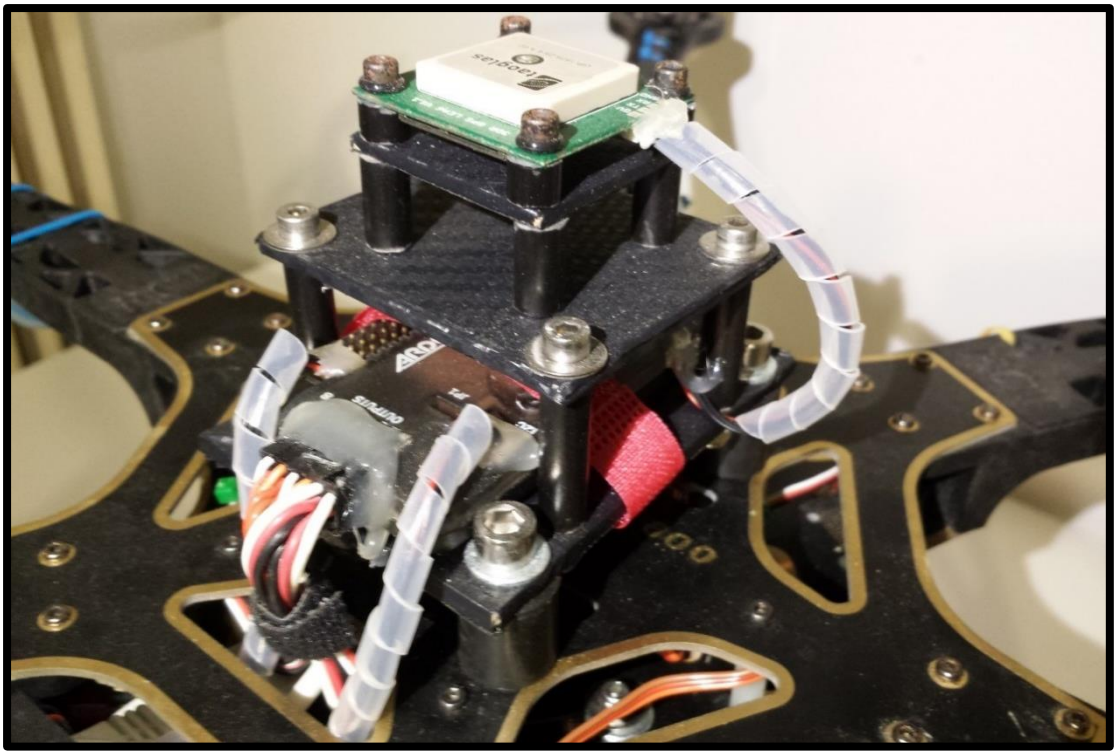
Το επόμενο στάδιο ήταν η συγκόλληση των καλωδίων τροφοδοσίας ρεύματος των ελεγκτών ταχύτητας (ESC) στο κάτω μέρος του σκελετού (frame) που αποτελεί (το frame) και σύστημα τροφοδοσίας ρεύματος από τις μπαταρίες στους ελεγκτές (power distribution board). Κατασκευάστηκαν ειδικές βάσεις, οι οποίες βιδώθηκαν πάνω στον σκελετό με συγκεκριμένους αποστάτες από λάστιχο για την απόσβεση των κραδασμών. Στις βάσεις αυτές πρόκειται, σε επόμενο στάδιο, να τοποθετηθεί η μονάδα ελέγχου (Ardupilot) και η πλακέτα του GPS (ublox LEA-6). (Σχήμα 5.6). Οι κραδασμοί στα δυο αυτά σημεία μπορούν να προκαλέσουν αρνητικά αποτελέσματα και να οδηγήσουν στην ασταθή πτήση του εξακόπτερου.

Όλα τα εξαρτήματα της πλατφόρμας συνδέονται στην μονάδα ελέγχου (flight controller) με τρόπο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (Σχήμα 5.5). Αρχικά, ο χειριστής χρησιμοποιώντας τον πομπό της τηλεκατεύθυνσης έχει τον απόλυτο έλεγχο του εξακόπτερου όπως επίσης και την επιλογή των επιλογών πτήσης (flight modes), που ακολουθεί το όχημα. Τα σήματα από τον πομπό μεταφέρονται μέσω συχνότητας 2.4 Ghz στον δέκτη, ο οποίος είναι πάνω στο εξακόπτερο και συνδεδεμένος με την μονάδα ελέγχου. Έπειτα η κεντρική αυτή μονάδα λαμβάνοντας ως είσοδο (inputs) τις εντολές του χειριστή και σε συνδυασμό με τους γυροσκοπικούς και τους άλλους αισθητήρες που υπάρχουν, στέλνει σήματα στους ελεγκτές ταχύτητας (ESCs) για την αυξομείωση των στροφών στα τριφασικά μοτέρ, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται όλες οι κινήσεις του εξακόπτερου μέσω της διαδικασίας αυτής. Στη

συνέχεια, μέσω της τηλεμετρίας, πραγματοποιείται η επικοινωνία της μονάδας ελέγχου με τον υπολογιστή του σταθμού εδάφους, στέλνοντας και λαμβάνοντας συνεχώς δεδομένα (real time data) για την πτήση. Η μονάδα του GPS αναλαμβάνει τον δορυφορικό εντοπισμό του εξακόπτερου και μέσω αυτής είναι δυνατή η πλοήγησή του στην επιλογή του αυτομάτου πιλότου (Auto flight mode). Τέλος η μπαταρία συνδέεται απευθείας στους ελεγκτές ταχύτητας μέσω ειδικών πιστοποιημένων καλωδίων, τα οποία επιτρέπουν την διάδοση μεγάλων εντάσεων ρεύματος.



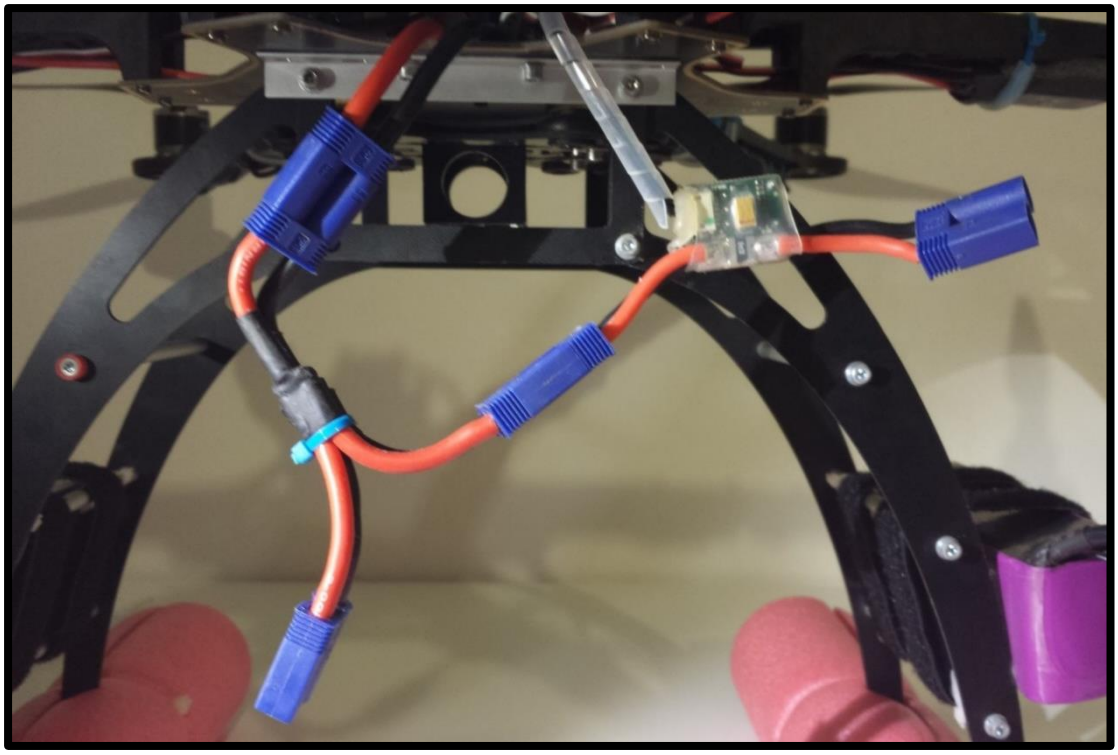

Σχήμα 5.5: Απεικόνιση της συνδεσμολογίας όλων των εξαρτημάτων του UAV.



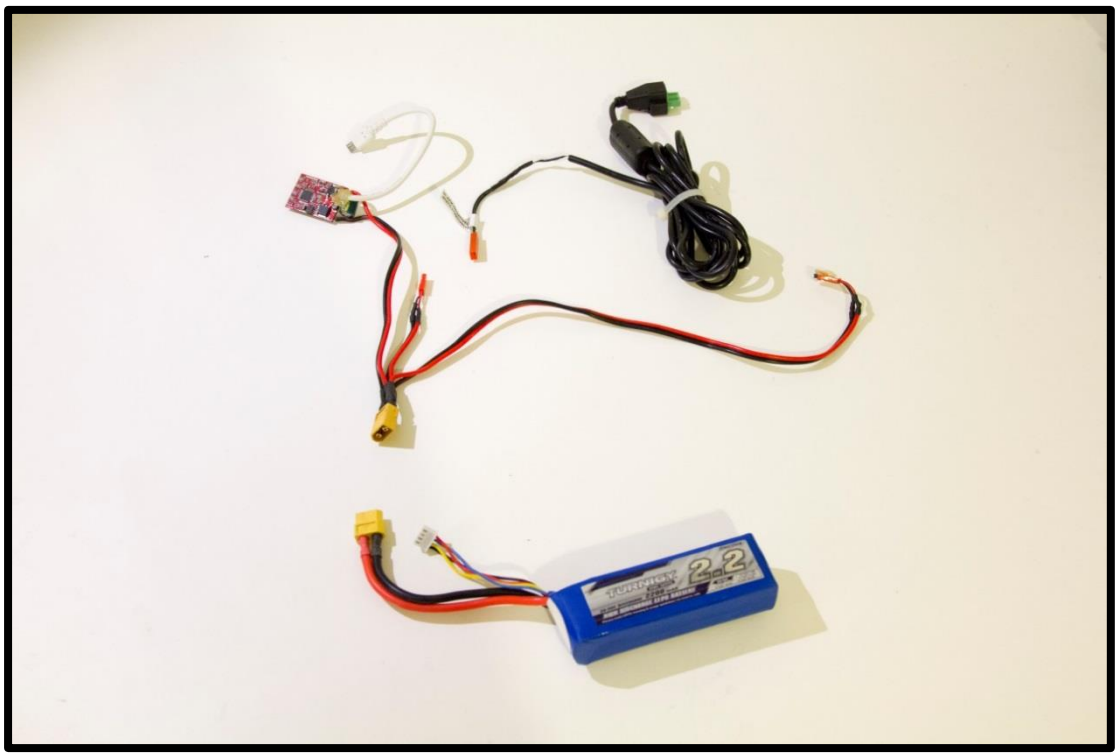
Σχήμα 5.6: Η βάση που κατασκευάστηκε για την πλακέτα ελέγχου και την μονάδα του GPS.

Επόμενο στάδιο αποτελεί η κατασκευή καλωδίων ολόκληρου του εξακόπτερου. Για την καλωδίωση της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκαν καλώδια με συγκεκριμένου τύπου συνδέσμους (connectors) στις εισόδους και εξόδους της μονάδας ελέγχου και καλώδια τροφοδοσίας ρεύματος με ειδικού τύπου συνδέσμους (ιδανικούς για τροφοδοσία μεγάλων εντάσεων ρεύματος) με χαρακτηριστικά 10 AWG (American Wire Gauge) (Σχήμα 5.7).

Για το σύστημα της κάμερας κατασκευάστηκε καλωδίωση για την τροφοδοσία του Router, της ίδιας της κάμερας και της βάσης της. Η καλωδίωση αυτή τροφοδοτείται από διαφορετική μπαταρία Ιόντων Πολυμερούς (Li-Po) 11,1 Volt και χωρητικότητας 2200 mAh όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. (Σχήμα 5.8). Αξίζει να αναφερθεί ότι όλες οι καλωδιώσεις και οι συνδέσεις πραγματοποιήθηκαν με σταθμό βάσης κόλλησης υψηλής ποιότητας και στο τέλος επενδύθηκαν με θερμοσυστελλόμενα. Τέλος, αφού τελειοποιήθηκαν όλες οι κολλήσεις, οι συνδέσεις ασφαλίστηκαν με θερμή σιλικόνη για να εξασφαλιστεί η αποφυγή αποκόλλησης κατά την διάρκεια της πτήσης.



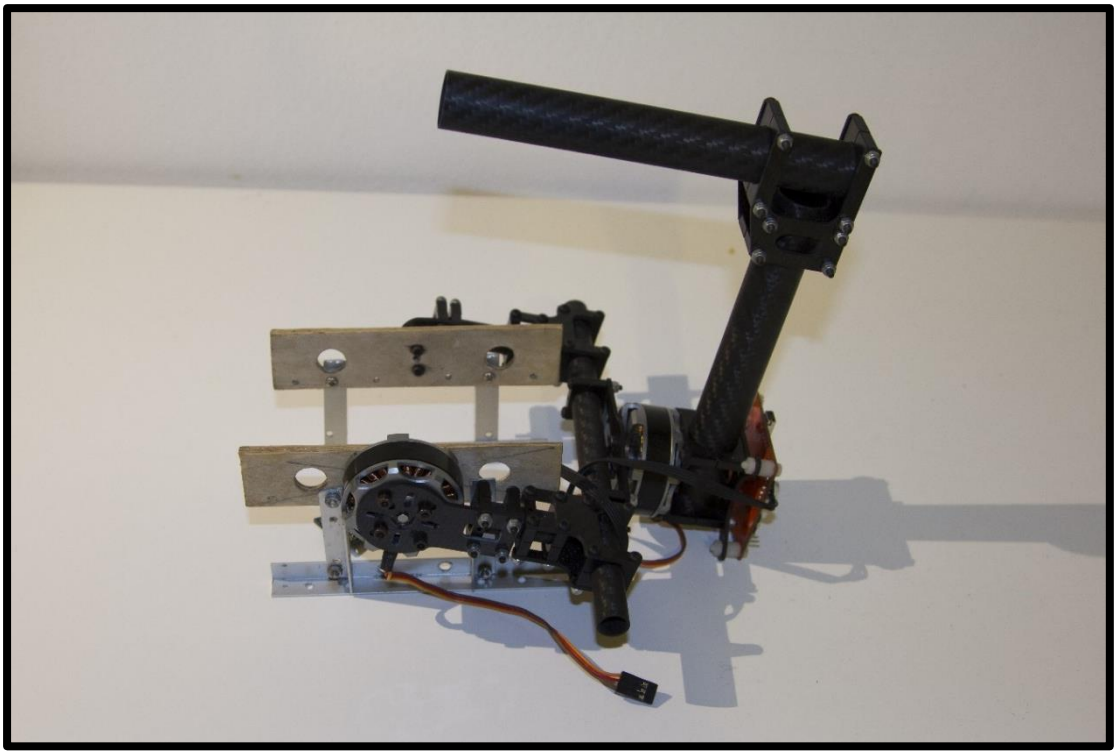
Σχήμα 5.7: Τα καλώδια τροφοδοσίας του εξακόπτερου.



Σχήμα 5.8: Η καλωδίωση του συστήματος καταγραφής.

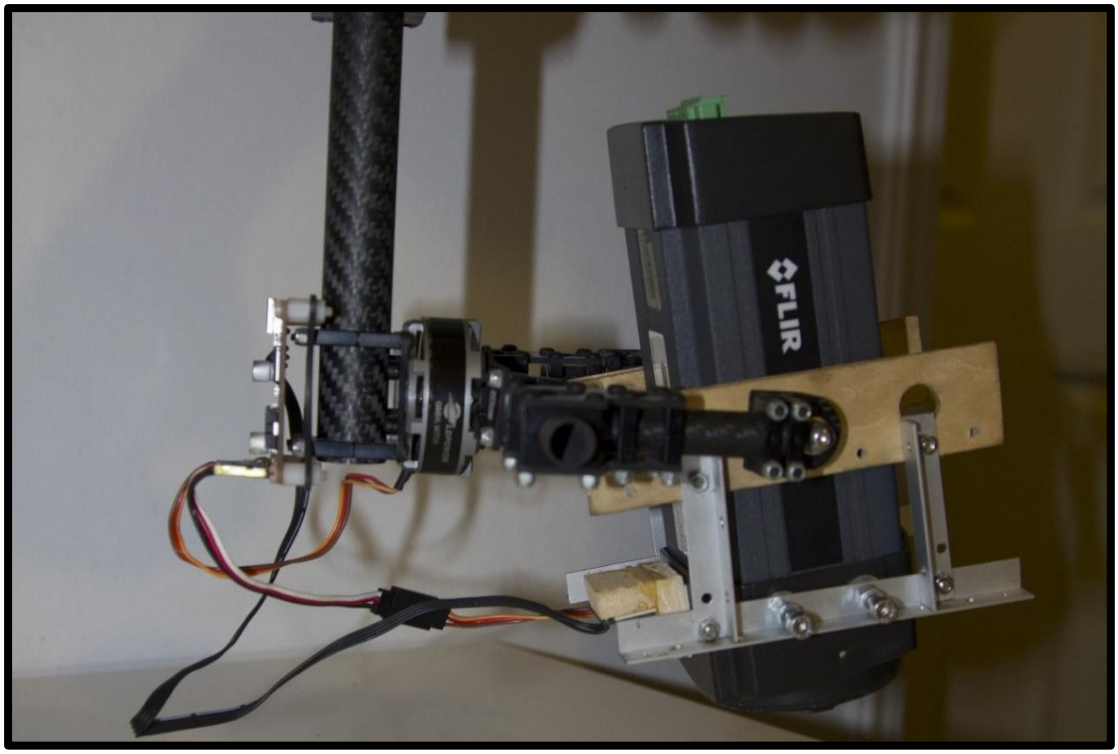
### 5.1.5 Σύστημα καταγραφής

Το τελικό στάδιο της κατασκευής περιλαμβάνει την κατασκευή του συστήματος της κάμερας. Αρχικά συναρμολογήθηκε εξ ολοκλήρου η βάση της κάμερας και αφού προσαρμόστηκαν τα δυο μοτέρ πάνω σε αυτήν, βιδώθηκε και στερεώθηκε με ασφάλεια πάνω στο εξακόπτερο. Επίσης, ένα άλλο ζήτημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν η προσαρμογή της κάμερας πάνω στην βάση. Έτσι κατασκευάστηκαν συγκεκριμένοι προσαρμογείς (adaptors) από ξύλο και γωνίες αλουμινίου, οι οποίοι εξασφαλίζουν την επιθυμητή σταθερότητα της κάμερας και την ασφαλή κίνησή της πάνω σε αυτήν. Για την ομαλή λειτουργία της βάσης και για την βέλτιστη απόδοσή της πρέπει το κέντρο βάρους της κάμερας να ταυτίζεται με το σημείο τομής των αξόνων των δυο μοτέρ (Σχήμα 5.9).

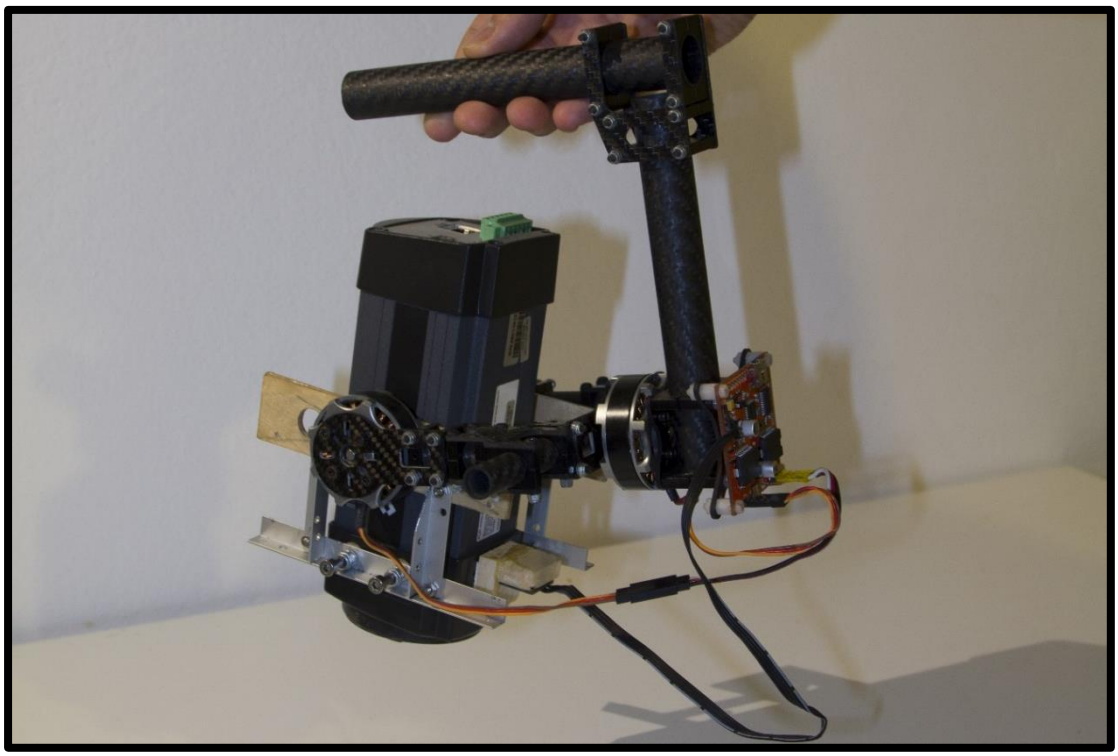


Σχήμα 5.9: Η βάση συναρμολογημένη με τους ειδικούς προσαρμογείς που κατασκευάστηκαν.

Έτσι λοιπόν, στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζεται η βάση της κάμερα με προσαρμοσμένη την θερμική κάμερα (Flir A315) του τμήματος Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.




Σχήμα 5.10: Εικόνα της βάσης με προσαρμοσμένη την κάμερα (δεξιά πλευρά).



Σχήμα 5.11: Εικόνα της βάσης με προσαρμοσμένη την κάμερα (αριστερή πλευρά).

### 5.1.6 Τελικό στάδιο – προγραμματισμός συστημάτων

Το τελικό στάδιο των ρυθμίσεων και προγραμματισμού ολόκληρου του συστήματος ήταν ιδιαίτερα απαιτητικό και χρονοβόρο καθώς χρειάστηκαν αρκετές ώρες δοκιμών, τόσο στατικά όσο και σε επίπεδο πτήσης. Έπρεπε να ρυθμιστούν όλα τα συστήματα της μονάδας ελέγχου και να ελεγχθούν για την ομαλή λειτουργία τους. Δέκτης GPS, πυξίδα, επιταγχυσιόμετρο, τριών αξόνων γυροσκόπια, βαρόμετρο, τηλεμετρία και λοιπός εξοπλισμός έπρεπε να ρυθμιστούν το καθ' ένα ξεχωριστά και να ελεγχθούν με σκοπό την ομαλή και ασφαλή πτήση του εξακόπτερου. Το στάδιο αυτό είναι το σημαντικότερο όλων καθώς μία λανθασμένη παράμετρος ή ρύθμιση μπορεί να προκαλέσει την πτώση του εξακόπτερου.

Εκτός από την μονάδα ελέγχου, προγραμματισμό απαιτεί και το σύστημα της κάμερας. Η πλακέτα που περιέχει το σύστημα γυροσκοπίων και δίνει εντολές στα τριφασικά μοτέρ για την διόρθωση της κάμερας όπως θα αναφέρουμε παρακάτω, είναι και αυτή ανοιχτού κώδικα (open source) και συγκεκριμένα Arduino. Έτσι, μέσω καλωδίου USB, φορτώνεται το λογισμικό και στη συνέχεια ρυθμίζονται οι μεταβλητές PIDs (Proportional – Integral – Derivative) για την συγκεκριμένη κάμερα ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια διόρθωσης σε οποιαδήποτε γωνία pitch και roll κι αν πάρει το εξακόπτερο.

Σοβαρό πρόβλημα που έπρεπε να επιλυθεί ήταν οι παρεμβολές που παρουσιάστηκαν στην μονάδα ελέγχου της βάσης της κάμερας. Αυτές οφείλονταν στο ότι γύρω από τους σωλήνες από ανθρακονήματα της βάσης είχαν τοποθετηθεί τα καλώδια τροφοδοσίας του εξακόπτερου. Έτσι λόγω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και στάσιμων κυμάτων κατά την διάρκεια λειτουργίας των μοτέρ η βάση της κάμερας κινούνταν ανεξέλεγκτα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε βάζοντας ειδικούς φερίτες στα καλώδια της μονάδας ελέγχου και αντικαθιστώντας τους σωλήνες από ανθρακόνημα με ξύλινους, καθώς το ανθρακόνημα θεωρείται μη συμβατό υλικό όταν γύρω από αυτό υπάρχουν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

## 5.2 Περιγραφή πλατφόρμας UAV

Αφού κατασκευάστηκε και ρυθμίστηκε η πλατφόρμα του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV) έγιναν οι απαραίτητες πτητικές δοκιμές. Το εξακόπτερο αυτό διαθέτει σύστημα αυτόματου πιλότου, ικανό να πλοηγήσει το σκάφος σε συγκεκριμένα σημεία (waypoints) που θα ορίσει ο χειριστής μέσω της τηλεμετρίας, η οποία εκτός αυτού μεταδίδει και σε πραγματικό χρόνο (real time) δεδομένα με τα στοιχεία της πτήσης (Σχήμα 5.10). Αναλυτικότερα, η πλατφόρμα αποτελείται από έξι τριφασικούς ρότορες οι οποίοι ελέγχονται μέσω των ειδικών ηλεκτρονικών ρυθμιστών (Electronic Speed Control – ESC) και συνδέονται μέσω αυτών στον ελεγκτή (flight controller – Ardupilot) του σκάφους, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.1.4. Οι προπέλες που χρησιμοποιήθηκαν είναι από ανθρακόνημα με σκοπό την

ελαχιστοποίηση της μάζας και της κατανάλωσης. Αυτές, κατά τη μέγιστη απόδοση των μοτέρ στο 100%, μπορούν να παράγουν συνολική ώση περίπου 12 kg. Η πλακέτα του ελεγκτή ενσωματώνει τους γυροσκοπικούς αισθητήρες, το κύκλωμα του αυτόματου πιλότου, επιταγχυσιόμετρο, βαρόμετρο, πυξίδα, συνδέεται με εξωτερική μονάδα GPS και πομποδέκτη τηλεμετρίας. Η αυτονομία της συγκεκριμένης πλατφόρμας υπολογίζεται σε περίπου 10 min για κάθε ζευγάρι μπαταριών (όπως αναφέραμε παραπάνω) με τελική μάζα να φθάνει τα 5,5 kg.

Τέλος, πάνω στην πλατφόρμα τοποθετήθηκε ένα μικρό Router, ρυθμισμένο σε Bridge λειτουργία (DHCP server) και συνδεδεμένο με καλώδιο Ethernet πάνω στην κάμερα, προγραμματισμένο με σκοπό να μεταφέρει την εικόνα από την θερμική κάμερα στον σταθμό βάσης μέσω ασύρματου δικτύου Wifi. Έτσι, αφού ολοκληρώθηκε η κατασκευή του εξακόπτερου με όλα τα συστήματα σε πλήρη λειτουργική κατάσταση παρουσιάζεται στις παρακάτω φωτογραφίες (Σχήμα 5.12 και 5.13).




Σχήμα 5.12: Ο αυτόματος πιλότος της πλατφόρμας.

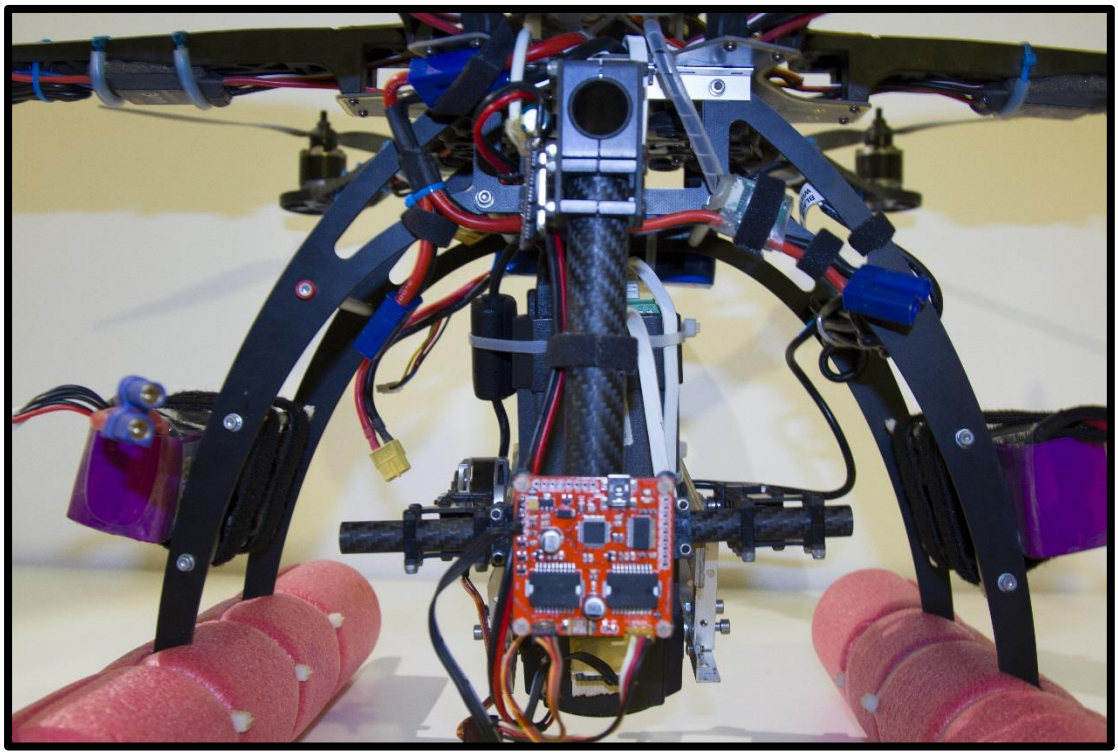


Σχήμα 5.13: Το εξακόπτερο τελειοποιημένο έτοιμο για πτήση (πάνω: πίσω πλευρά, κάτω: μπροστινή πλευρά).

## 5.3 Περιγραφή συστήματος κάμερας

Το σύστημα της κάμερας αποτελείται από την ίδια την κάμερα (Σχήμα 5.15) καθώς και από ειδική βάση, η οποία αφενός εξασφαλίζει την ασφαλή μεταφορά της κάμερας και αφετέρου την κίνησή της, ώστε να έχει τη δυνατότητα ο χειριστής ανά πάσα στιγμή να μετακινεί την κάμερα προς όποια κατεύθυνση θελήσει μέσω του χειριστηρίου. Επιπροσθέτως, άλλη μια δυνατότητα της συγκεκριμένης βάσης είναι και η συνεχής διόρθωση της θέσης της κάμερας στους δύο άξονες με σκοπό το οπτικό της πεδίο να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο πτήσης του εξακόπτερου, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτούμενες διορθώσεις αργότερα στην επεξεργασία της εικόνας. Με το σύστημα αυτό λοιπόν, παρέχεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια διόρθωσης στην σταθεροποίηση της κάμερας πάντα κάθετα στον άξονα της πτήσης, σε οποιαδήποτε γωνία pitch και roll κι αν βρεθεί το εξακόπτερο.

Η παραπάνω κίνηση πραγματοποιείται από δυο τριφασικά μοτέρ, ένα για κάθε άξονα διόρθωσης (pitch, roll), τα οποία συνδέονται κατευθείαν πάνω στην πλακέτα ελέγχου. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι συγκεκριμένου τύπου βάσεις είναι τελευταίας τεχνολογίας και σταδιακά αντικαθιστούν τις κοινές βάσεις με τους σερβομηχανισμούς, καθώς υπερέχουν σημαντικά στην ακρίβεια της διόρθωσης που προσφέρουν (Σχήμα 5.14)



Σχήμα 5.14: Το σύστημα της κάμερας σε πλήρη λειτουργική κατάσταση (πίσω μέρος).

Τα χαρακτηριστικά της θερμικής κάμερας όπως αναφέρονται από τον κατασκευαστή παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά της θερμικής κάμερας. (Πηγή: FLIR Systems Inc, 2013)

| **Χαρακτηριστικά απεικόνισης και οπτικών δεδομένων** | |
|---|---|
| Οπτικό πεδίο (FOV) / Ελάχιστη απόσταση εστίασης | 25° × 18.8° / 0.4 m |
| Φακός αυτόματης αναγνώρισης | Αυτόματο |
| Θερμική ευαισθησία / NETD | < 0.05°C στους +30°C / 50 mK |
| Εστίαση | Αυτόματο ή χειροκίνητο (ενσωματωμένο μοτέρ) |
| Αριθμός F | 1.3 |
| Συχνότητα εικόνας | 30 Hz |
| Zoom | 1–8× συνεχόμενο, ψηφιακό, παρεμβάλλοντας ζουμ σε εικόνες |
| **Στοιχεία ανιχνευτή** | |
| Ανάλυση IR | 320 × 240 pixels |
| Ανιχνευτής pitch | 25 μm |
| Ανιχνευτής time constant | Τυπικό 12 ms |
| Συστοιχία εστιακού επιπέδου (FPA) / Φασματική περιοχή | Uncooled microbolometer / 7.5 – 13 μm |
| **Μέτρηση** | |
| Εύρος θερμοκρασίας αντικειμένου | –20 έως +120°C<br>0 έως +350°C |
| Ακρίβεια | ±2°C or ±2% της ένδειξης |




Σχήμα 5.15: Η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την θερμική καταγραφή.

## 5.4 Συμπεράσματα

Από τις προηγούμενες ενότητες γίνεται αντιληπτό πως η κατασκευή της πρωτότυπης πλατφόρμας UAV ήταν ιδιαίτερα απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία. Όπως και σε κάθε άλλη πρότυπη κατασκευή εμφανίστηκαν και αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς διάφορα σοβαρά και δύσκολα ζητήματα. Ωστόσο, το τελικό αποτέλεσμα ήταν αξιόπιστο και τεχνικά ανώτερο έτοιμων εμπορικών λύσεων ενώ ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής του κυμάνθηκε σε ποσοστό 20% της φθηνότερης εμπορικής λύσης. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο προγραμματισμός και η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας θερμικών καταγραφών στην περιοχή του φράγματος Αμαρίου.

# Κεφάλαιο 6: Διεξαγωγή πτήσεων θερμικής καταγραφής

Η διεξαγωγή των μετρήσεων ξεκίνησε με τη μετάβαση στο πεδίο την Τρίτη 19/11/2013 στις 5:30 π.μ. Μεταφέρθηκε όλος ο εξοπλισμός στο πεδίο χειροκίνητα λόγω της δύσβατης περιοχής.

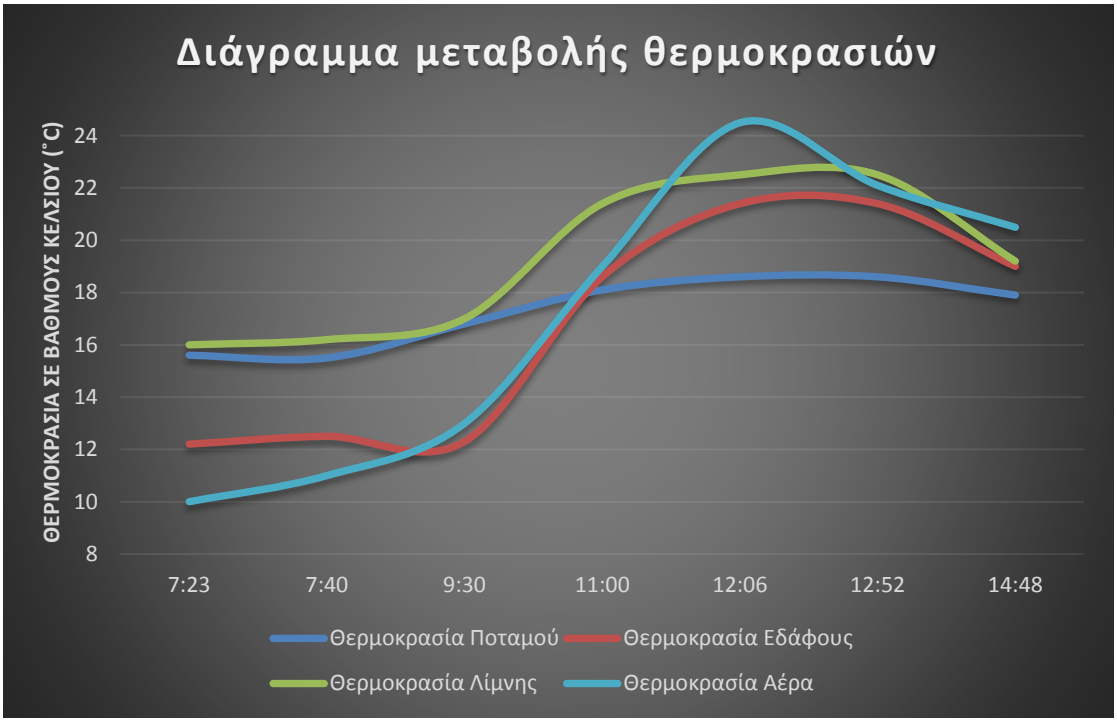
## 6.1 Προετοιμασία φωτοσταθερών

Το πρώτο στάδιο μετά την άφιξή στο πεδίο ήταν η προετοιμασία των αυτοσχέδιων φωτοσταθερών. Τα δοχεία των πυρσών (δάδες) γέμισαν με φωτιστικό πετρέλαιο και αφού άναψαν, τοποθετήθηκαν μέσα στον κάνναβο όπως φαίνεται στο σχέδιο που ακολουθεί. Τοποθετήθηκαν οι τέσσερις προς τη μεριά της λίμνης με σκοπό να είναι γνωστός ο προσανατολισμός τους, όταν αυτοί θα παρατηρούνται αργότερα μέσα από την θερμική καταγραφή. Καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής στο πεδίο λαμβάνονταν τιμές ανά τακτά χρονικά διαστήματα ταχύτητας ανέμου, ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, θερμοκρασίας νερού λίμνης, θερμοκρασία νερού ποταμού (πριν την εισαγωγή του στη λίμνη) και υγρασίας (Σχήμα 6.1). Με αυτόν τον τρόπο ήταν γνωστός ο ρυθμός μεταβολής των στοιχείων συναρτήσει της ώρας (Σχήμα 6.2).



(α) (β) (γ)

Σχήμα 6.1: Η διαδικασία λήψης μετρήσεων (α) ταχύτητας ανέμου, (β) θερμοκρασία εδάφους, και (γ) θερμοκρασία νερού στο πεδίο.




Σχήμα 6.2: Διάγραμμα που απεικονίζει την μεταβολή των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της παραμονής στο πεδίο.

## 6.2 Σταθμός βάσης

Αμέσως μετά την μεταφορά στο πεδίο στήθηκε ο σταθμός βάσης, ο οποίος είναι απαραίτητος για την εκτέλεση των πτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός περιλαμβάνει δυο φορητούς υπολογιστές και σύστημα τροφοδοσίας ρεύματος 12 Volt από μπαταρία αυτοκινήτου, εξασφαλίζοντας την συνεχή τροφοδοσία τους. Ο πρώτος υπολογιστής χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του UAV δηλαδή, τη δημιουργία, την αποστολή σχεδίου πτήσης και την παρακολούθηση του κατά την λειτουργία του αυτομάτου πιλότου. Ο δεύτερος χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τον έλεγχο της κάμερας μέσω των προγραμμάτων της κατασκευάστριας εταιρείας, δηλαδή η επιλογή αυτόματης εστίασης του φακού (autofocus), η επιλογή για να ξεκινήσει και να σταματήσει η εγγραφή (start / stop record) και η παρακολούθηση της θερμικής καταγραφής στην οθόνη του υπολογιστή.

Ο δεύτερος αυτός υπολογιστής του σταθμού βάσης που είχε τον έλεγχο της κάμερας συνδέθηκε μέσω καλωδίου (Ethernet) με συγκεκριμένο Access Point το οποίο διέθετε τρεις κεραίες (5 dBi Omni-Directional) και ήταν προγραμματισμένο σε λειτουργία επέκτασης ασύρματου δικτύου (Range Extender Mode). Σκοπός ήταν η βελτιστοποίηση του τοπικού δικτύου για επίτευξη ισχυρότερου σήματος και ταχύτερη μεταφορά δεδομένων από το εξακόπτερο προς τον σταθμό βάσης.

Η επιλογή της τεχνικής αυτής λύσης έγινε καθώς προγενέστερη πειραματική προσπάθεια (χωρίς Access Point) στο ίδιο πεδίο δεν κατέστη δυνατό να δώσει αποτελέσματα λόγω του μεγάλου όγκου των εικόνων και της απόστασης ανάμεσα στον σταθμό βάσης και το εξακόπτερο, δεν υπήρχε η δυνατότητα συνεχούς επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων.

Με την τεχνική που επελέγη επιτεύχθηκε μεταφορά δεδομένων με ταχύτητες περίπου 2,7 MByte/second όπως επίσης και ένα αρκετά μεγάλο εύρος απόστασης ανάμεσα στον σταθμό και το UAV. Τέλος, στον σταθμό βάσης υπήρξε ένας ακόμα φορητός υπολογιστής για εφεδρεία καθώς και εργαλεία για τον τεχνικό έλεγχο του εξακόπτερου, πριν και μετά από κάθε πτήση ή σε περίπτωση βλάβης. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ο σταθμός βάσης, με όλο τον εξοπλισμό όπως στήθηκε στο πεδίο.



Σχήμα 6.3: Εικόνα που απεικονίζει τον σταθμό βάσης που στήθηκε στο πεδίο.

## 6.3 Λίστα ελέγχου (checklists)

Για την σωστή και ασφαλή λειτουργία του εξακόπτερου γίνονται κάποιοι απαραίτητοι έλεγχοι και ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία πριν και κατά την διάρκεια της πτήσης. Το εξακόπτερο και παρόμοιου τύπου πλατφόρμες πρέπει να αντιμετωπίζονται με απόλυτη σοβαρότητα και σύνεση για την ορθή λειτουργία και την αποφυγή ατυχημάτων που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρούς τραυματισμούς. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η παρακάτω λίστα ελέγχου, η οποία πρέπει να τηρείται πάντα σε τέτοιου είδους οχήματα (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Λίστα ελέγχου (Checklist).

| **Τεχνικός έλεγχος πριν την εκκίνηση** |
| --- |
| • Έλεγχος με κλειδί όλων των προπελών ότι είναι σφιγμένες σωστά.<br>• Έλεγχος όλων των βιδών ότι είναι σφιγμένες σωστά.<br>• Έλεγχος σε όλες τις μπαταρίες ότι είναι στερεωμένες σωστά πάνω στην πλατφόρμα.<br>• Έλεγχος ολόκληρης της καλωδίωσης για τυχόν φθορά από την προηγούμενη πτήση.<br>• Έλεγχος της μονάδας ελέγχου ότι είναι σταθεροποιημένη σωστά πάνω στην βάση της.<br>• Έλεγχος στην βάση της κάμερας ότι είναι σταθερή και ότι το κινούμενο μέρος κινείται ελεύθερα. |
| **Κατά την εκκίνηση** |
| • Ενεργοποιούμε το σύστημα τηλεκατεύθυνσης (πομπό), σιγουρευόμαστε ότι εκπέμπει αναπτύσσουμε την κεραία (αν υπάρχει).<br>• Τοποθετούμε τον μοχλό (joystick) των στοιχείων των κινητήρων στο μηδέν (idle) και τους διακόπτες των flight modes σε χειροκίνητη πτήση (manual mode).<br>• Ελέγχουμε ότι οι έλικες γυρίζουν ελεύθερα και ότι δεν υπάρχει κάτω και γύρω από αυτούς κάποιο αντικείμενο που μπορεί να έρθει σε επαφή με αυτούς.<br>• Τροφοδοτούμε την πλατφόρμα με ρεύμα από τις μπαταρίες, προσέχοντας να διατηρούμε το σώμα μας μακριά από τους έλικες και απομακρυνόμαστε όταν ολοκληρώσουμε τη διαδικασία.<br>• Γίνεται η σύνδεση με τον υπολογιστή εδάφους μέσω τηλεμετρίας.<br>• Οπλίζουμε τα στοιχεία των κινητήρων από τον μοχλό (joystick).<br>• Φωνάζουμε «απογείωση» και δίνουμε στοιχεία στους κινητήρες αργά και σταδιακά.<br>• Ελέγχουμε ότι όλοι οι κινητήρες ανταπεξέρχονται και διατηρούμε απόσταση ασφαλείας από την πλατφόρμα.<br>• Απογειώνουμε την πλατφόρμα σιγά σιγά και σταδιακά.<br>• Ελέγχουμε με μικροκινήσεις ότι η πλατφόρμα υπακούει στις κινήσεις όλων των μοχλών.<br>• Αυξάνουμε το ύψος και πραγματοποιούμε την πτήση. |
| **Κατά την προσγείωση** |
| • Μόλις θέλουμε να προσγειωθούμε φωνάζουμε «προσγείωση».<br>• Κατά την προσγείωση χαμηλώνουμε αργά και σταδιακά ύψος.<br>• Αφού προσγειωθούμε αποσυνδέουμε τις μπαταρίες τροφοδοσίας της πλατφόρμας.<br>• Τέλος κλείνουμε το σύστημα τηλεκατεύθυνσης (πομπό). |

## 6.4 Πρωινή θερμική καταγραφή

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν όλοι οι παραπάνω έλεγχοι στο εξακόπτερο για να διασφαλιστεί η ασφάλεια της πτήσης και η σωστή λειτουργία των συστημάτων. Η πρωινή καταγραφή έπρεπε να πραγματοποιηθεί πριν την ανατολή του ήλιου. Έτσι λοιπόν, γνωρίζοντας την ακριβή ώρα της ανατολής την μέρα εκείνη, ξεκίνησε εγκαίρως η διαδικασία για την προετοιμασία της πτήσης. Φορτώθηκαν οι μπαταρίες στο εξακόπτερο ενεργοποιήθηκαν οι υπολογιστές και έγινε σύνδεση μεταξύ αυτών και του εξακόπτερου. Περάστηκαν οι τιμές της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, της υγρασίας και του ύψους πτήσης στο λογισμικό Fsviewer, το οποίο είναι της εταιρείας Flir (κατασκευάστρια εταιρεία της θερμικής κάμερας), όπου θα μετέδιδε και αποτύπωνε τις εικόνες της θερμικής καταγραφής. Σύμφωνα με τις καταγεγραμμένες θερμοκρασίες στην περιοχή, δηλαδή εδάφους, ποταμού και λίμνης, ρυθμίστηκε το μετρούμενο -από το πρόγραμμα- εύρος θερμοκρασιών $10^{o}$ – $20^{o}$. Η πρώτη πτήση πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και αποθηκεύτηκαν, μέσω του προγράμματος, 1500 περίπου φωτογραφίες της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, αφού έγινε μια πρόχειρη ανάλυση των δεδομένων αυτών, πραγματοποιήθηκε εκ νέου τεχνικός έλεγχος του εξακόπτερου και ξεκίνησε η διαδικασία φόρτισης των μπαταριών για την επόμενη πτήση.



Σχήμα 6.4: Εικόνα που απεικονίζει το εξακόπτερο και τον εξοπλισμό του στο πεδίο κατά την διάρκεια της αναμονής για την δεύτερη πτήση.

## 6.5 Μεσημεριανή θερμική καταγραφή

Κατά την δεύτερη πτήση (μεσημεριανή) ακολούθησε η ίδια διαδικασία με την πρωινή. Μετρήσεις θερμοκρασιών και υγρασίας με σκοπό την εισαγωγή τους στο λογισμικό καταγραφής. Εξαιτίας της αυξημένης θερμοκρασίας του μεσημεριού, το εύρος των μετρούμενων θερμοκρασιών από το πρόγραμμα ρυθμίστηκε στο $15^{o} – 25^{o}$. Επίσης ενώ το πρωί η ταχύτητα ανέμου ήταν άπνοια, το μεσημέρι αυξήθηκε 15 – 20 km/h χωρίς όμως αυτό να αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Εφόσον πραγματοποιήθηκε εκ νέου τεχνικός έλεγχος, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη πτήση (μεσημεριανή), όταν οι θερμοκρασίες του εδάφους είχαν αποκτήσει τη μέγιστη τιμή τους. Ακολουθεί φωτογραφία κατά την στιγμή της απογείωσης της δεύτερης πτήσης (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5: Εικόνα κατά την διάρκεια απογείωσης μέσω χειριστηρίου τηλεκατεύθυνσης για την δεύτερη πτήση.

Όπως και στην πρώτη πτήση, ομοίως και στη δεύτερη λήφθηκαν επίσης 1500 περίπου φωτογραφίες. Κατά την παραμονή στο πεδίο μέχρι την δεύτερη πτήση υπήρχε άφθονος χρόνος για μέτρηση των φωτοσταθερών (πυρσοί) (Σχήμα 6.7) με τη χρήση ολικού γεωδαιτικού σταθμού με σκοπό την ακριβή τους θέση σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων για την μετέπειτα γεωμετρική διόρθωση των μωσαϊκών (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6: Μέτρηση των φωτοσταθερών με ολικό γεωδαιτικό σταθμό του Πολυτεχνείου Κρήτης.



Σχήμα 6.7: Εικόνα των αυτοσχέδιων φωτοσταθερών (πυρσοί πετρελαίου).



Σχήμα 6.8: Εικόνα με τοποθετημένους και αναμμένους τους πυρσούς μέσα στον οριοθετημένο κάνναβο.

## 6.6 Σχέδιο πτήσης

Το σχέδιο πτήσης (σενάριο) σχεδιάστηκε για να το ακολουθήσει ο αυτόματος πιλότος με σκοπό την διεξαγωγή της θερμικής καταγραφής. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα νοητό ορθογώνιο παραλληλόγραμμο διαστάσεων 60 m x 20 m και μέσα σε αυτό σχεδιάστηκε ένας κάνναβος με τέσσερις γραμμές μελέτης με απόσταση 5 m η μία από την άλλη. Οι γραμμές μελέτης τοποθετήθηκαν αυτόματα από το πρόγραμμα αυτόματου πιλότου, εισάγοντας την επιθυμητή πλάγια επικάλυψη (=50%) ανάμεσα στις εικόνες, το ύψος πτήσης 24 m από το έδαφος, την εστιακή απόσταση (focal length) του φακού της κάμερας 18 mm και τις διαστάσεις του φακού (Σχήμα 6.9). Το λογισμικό όρισε τις γραμμές μελέτης και τα στοιχεία των εικόνων που θα αποτυπωνόταν.

Με βάση τα ανωτέρω, το ίχνος (footprint) κάθε εικόνας καταγραφής ήταν 10 m x 7,5 m στο έδαφος, ενώ η διακριτική της ικανότητα (ground resolution) δηλαδή το μέγεθος τετράγωνου εικονοστοιχείου ήταν 3,11 cm. Τα στοιχεία αυτά, όπως το συνολικό εμβαδόν της περιοχής μελέτης φαίνονται στο Σχήμα 6.10. Τέλος, η κάμερα καταγράφει φωτογραφίες με ρυθμό 9 Hz, δηλαδή 9 frames το δευτερόλεπτο, η επικάλυψη κατά τον άξονα πάνω στη γραμμή μελέτης είναι περίπου στο 95%. Τα παραπάνω ισχύουν με δεδομένο ότι η ταχύτητα πλοήγησης του εξακόπτερου, στην λειτουργία του αυτόματου πιλότου, ορίστηκε στο 1,5 m/s.




Σχήμα 6.9: Εικόνα του λογισμικού του αυτομάτου πιλότου, διακρίνεται το σχέδιο πτήσης που δημιουργήθηκε (κίτρινες γραμμές), στον οριοθετημένο κάνναβο της περιοχής μελέτης (κόκκινο πλαίσιο).




Σχήμα 6.10: Εικόνα που φαίνονται οι εικόνες που θα ληφθούν διακρίνοντας την πλάγια επικάλυψη στην περιοχή μελέτης (Footprint).

## 6.7 Συμπεράσματα

Η διαδικασία των μετρήσεων ήταν αρκετά επίπονη, χωρίς να λείπουν απρόοπτα όπως και σε κάθε εργασία πεδίου. Όμως αυτά επιλύθηκαν και λειτούργησε σωστά και αποτελεσματικά ολόκληρη η διαδικασία. Σε κάθε μέτρηση λήφθηκαν και αποθηκεύτηκαν περίπου 1.500 εικόνες θερμικής καταγραφής. Στο επόμενο Κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία επεξεργασία των εικόνων αυτών.

# Κεφάλαιο 7: Επεξεργασία αποτελεσμάτων θερμικής καταγραφής

Αφού πραγματοποιήθηκε με επιτυχία η διεξαγωγή των μετρήσεων σειρά είχε η επεξεργασία τους και δημιουργία φωτομωσαϊκού με τη χρήση συγκεκριμένου λογισμικού. Στη συνέχεια έγινε γεωμετρική διόρθωση των μωσαϊκών αυτών, μέσω των αυτοσχέδιων φωτοσταθερών, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων και το Κεφάλαιο αυτό κλείνει με την επεξεργασία των στοιχείων της πτήσης (data logs) και η απεικόνισή τους σε χάρτη Google Earth.

## 7.1 Δημιουργία φωτομωσαϊκού

Μετά την πρώτη διαλογή στο πεδίο ακολούθησε ένας εκτενέστερος διαχωρισμός στις εικόνες, παρατηρώντας κάθε μια ξεχωριστά. Αφαιρέθηκαν οι φωτογραφίες κατά τις οποίες το εξακόπτερο εκτελούσε στροφές $180^{o}$ (δηλαδή στο τέλος κάθε γραμμής μελέτης) για την αποφυγή αλλοίωσης του φωτομωσαϊκού στα σημεία εκείνα. Στη συνέχεια, αφού επιλέχθηκαν οι κατάλληλες εικόνες μετατράπηκαν σε μορφή (Format) *Jpeg, το οποίο μπορεί να εισαχθεί στο λογισμικό Microsost ICE που θα δημιουργήσει το μωσαϊκό ενώνοντας τις φωτογραφίες μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε πτήση (πρωινή, μεσημεριανή) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.2 και 7.3, αντίστοιχα, μετά την επεξεργασία τους, για καλύτερη οπτικοποίηση, από εμπορικό λογισμικό επεξεργασίας εικόνων (Photoshop). Επίσης, στα Σχήματα 7.4 και 7.4 παρατίθενται δυο φωτογραφίες στο οπτικό φάσμα με σκοπό την αντιστοιχία των θερμικών εικόνων της περιοχής μελέτης.

### 7.1.1 Αλγόριθμος συνένωσης εικόνων του Microsoft ICE

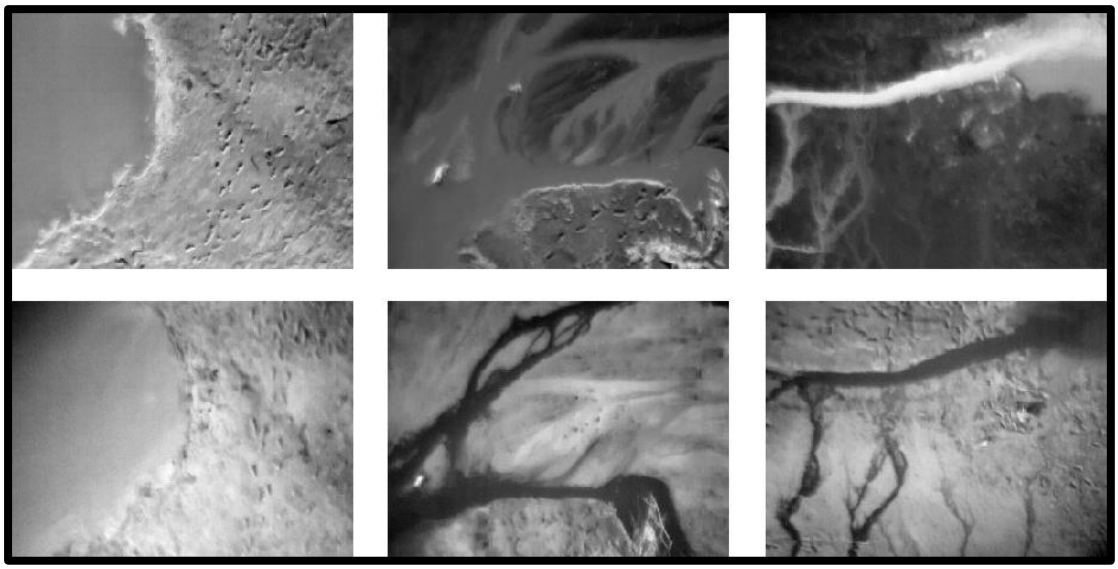
Οι κύριες τεχνικές προκλήσεις του φωτομωσαϊκού είναι πρώτον, να επιλεχθούν καλά κομμάτια ένωσης μεταξύ των διάφορων εικόνων, τα οποία θα ενωθούν μεταξύ τους με τα λιγότερα δυνατά κοινά σημεία και δεύτερον, να μειώσουν τυχόν υπολείμματα από τα περιγράμματα των εικόνων από την διαδικασία συνένωσης.

Για τον σκοπό αυτό η προσέγγιση του προγράμματος χρησιμοποιεί και συνδυάζει δυο μεθόδους: *graph-cut optimization* [Boykov et al. 2001], η οποία χρησιμοποιείται για να βρεθεί το βέλτιστο σημείο ραφής κατά μήκος των διάφορων φωτογραφιών και *gradient-domain fusion* η οποία χρησιμοποιεί εξισώσεις του Poisson [Perez et al. 2003; Fattal et al. 2002] και χρησιμοποιείται για να μειώσει ή να αφαιρέσει κάθε ορατό σημάδι, το οποίο τυχόν παρέμεινε από την συνένωση των εικόνων.

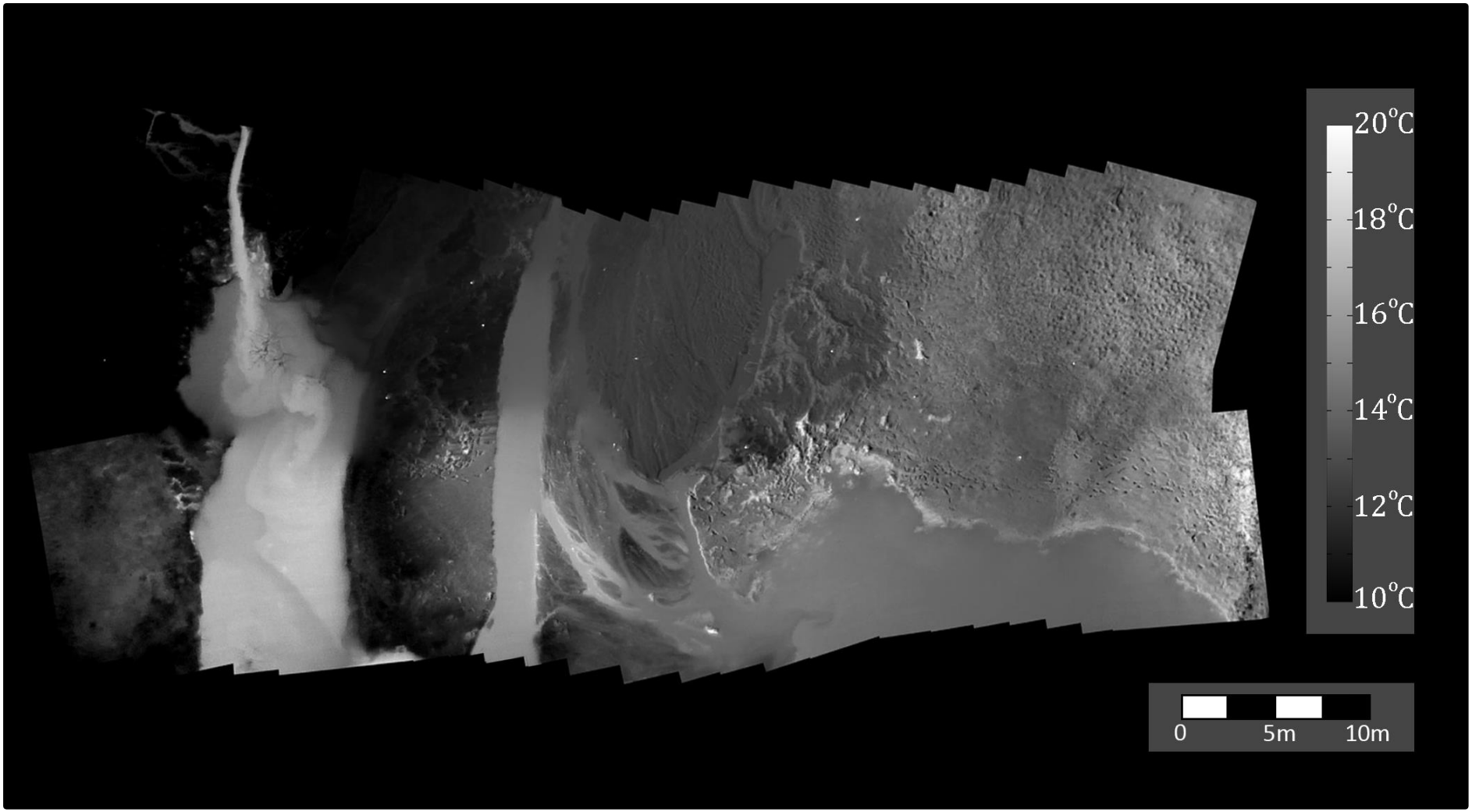
### 7.1.2 Συνένωση εικόνων

Όσον αφορά το φωτομωσαϊκό της πρωινής θερμικής καταγραφής χρησιμοποιήθηκαν 116 εικόνες και εισήχθησαν στο παραπάνω λογισμικό. Ο αλγόριθμος χρησιμοποίησε όλες τις εικόνες για την δημιουργία του τελικού μωσαϊκού, το οποίο έχει διαστάσεις 1927 pixels στο πλάτος (width) και 558 pixels στο ύψος (height) (Σχήμα 7.2).

Όσον αφορά το μωσαϊκό της μεσημεριανής θερμικής καταγραφής έγινε όπως προαναφέρθηκε σε δυο μέρη, λόγω αδυναμίας του αλγορίθμου να συνενώσει όλες τις εικόνες μαζί, πιθανόν λόγω μη επιθυμητής επικάλυψης στα σημεία εκείνα. Αυτό εξηγείται διότι κατά την πτήση της συγκεκριμένης καταγραφής είχε αυξηθεί αισθητά ο άνεμος στην περιοχή, ο οποίος έφθανε και σε ριπές τα 20 km/h. (Σχήμα 7.8) Έτσι εισήχθησαν στο λογισμικό συνένωσης οι εικόνες τις οποίες μπορούσε να συνενώσει και ελήφθησαν δυο τελικά μωσαϊκά, όπου στη συνέχεια συνενώθηκαν χειροκίνητα και με προσοχή σε εμπορικό λογισμικό επεξεργασίας εικόνων. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση αυτή οι εικόνες που εισήχθησαν ήταν πολύ περισσότερες από ότι της πρωινής καταγραφής για να υπάρχει μεγαλύτερη επικάλυψη, για τον λόγο που αναφέραμε παραπάνω. Το τελικό μωσαϊκό λοιπόν αποτελείται από 344 συνολικά εικόνες και έχει διαστάσεις 3472 στο πλάτος (width) και 2562 στο ύψος (height) (Σχήμα 7.3). Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατεθούν ενδεικτικά μερικές από τις εικόνες, όπως αυτές λήφθηκαν από την πλατφόρμα της θερμικής καταγραφής και πριν την εισαγωγή τους στο λογισμικό συνένωσης. Η ανάλυση κάθε εικόνας είναι 320 X 240 εικονοστοιχεία (pixels) (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Μερικές ενδεικτικές εικόνες της θερμικής καταγραφής (Πάνω: πρωινή καταγραφή, Κάτω: αντίστοιχες εικόνες στην μεσημεριανή θερμική καταγραφή).



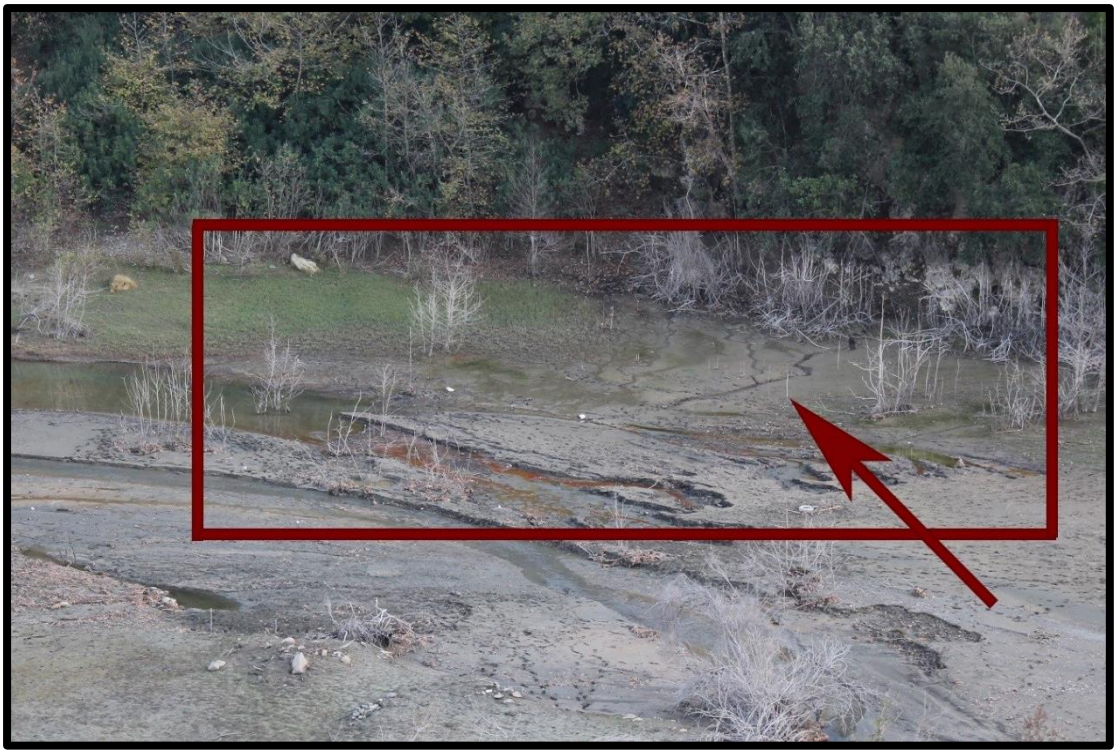

Σχήμα 7.2: Εικόνα του μωσαϊκού κατά την πρωινή θερμική καταγραφή.




Σχήμα 7.3: Εικόνα του μωσαϊκού κατά την μεσημεριανή θερμική καταγραφή.



Σχήμα 7.4: Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα.



Σχήμα 7.5: Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα ληφθείσα από το αριστερό πρανές, υποδεικνύοντας την μη φυσιολογική εισροή.

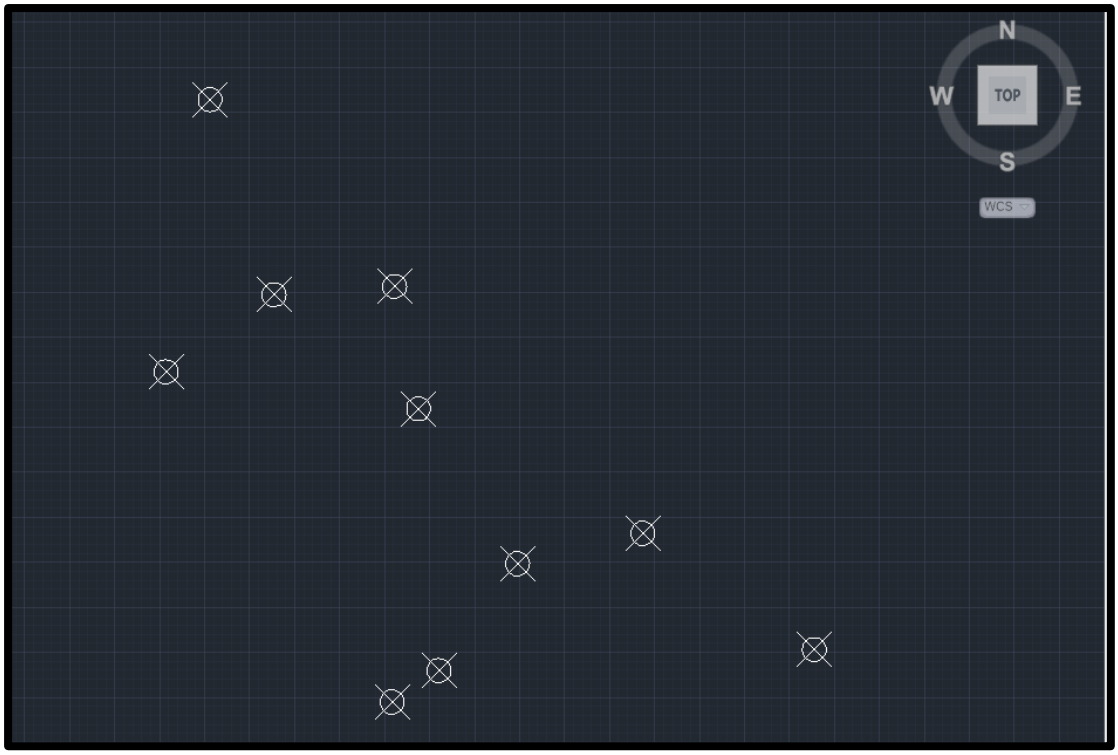
## 7.2 Γεωμετρική διόρθωση μωσαϊκών

Μετά την δημιουργία των μωσαϊκών σειρά είχε η γεωμετρική διόρθωσή (γεωαναφορά) τους. Αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστηρίου Γεωδαισίας και Γεωπληροφορικής στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν το ArcMap. Λόγω του ότι οι εικόνες που έπρεπε να διορθωθούν είναι στο θερμικό φάσμα, δεν είναι δυνατόν να διακριθούν με ευκολία τα σημεία του εδάφους, ώστε να γίνει η διόρθωση αυτή. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκαν τα φωτοσταθερά (πυρσοί πετρελαίου) στο έδαφος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με αποτέλεσμα αυτά να φαίνονται στην θερμική εικόνα λόγω αυξημένης θερμοκρασίας. Έχοντας λοιπόν τα σημεία των φωτοσταθερών αυτών σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων, αφού μετρήθηκαν με ολικό γεωδαιτικό σταθμό στο πεδίο την μέρα των πτήσεων, μπορεί να γίνει η συγκεκριμένη διόρθωση με σχετική ευκολία.

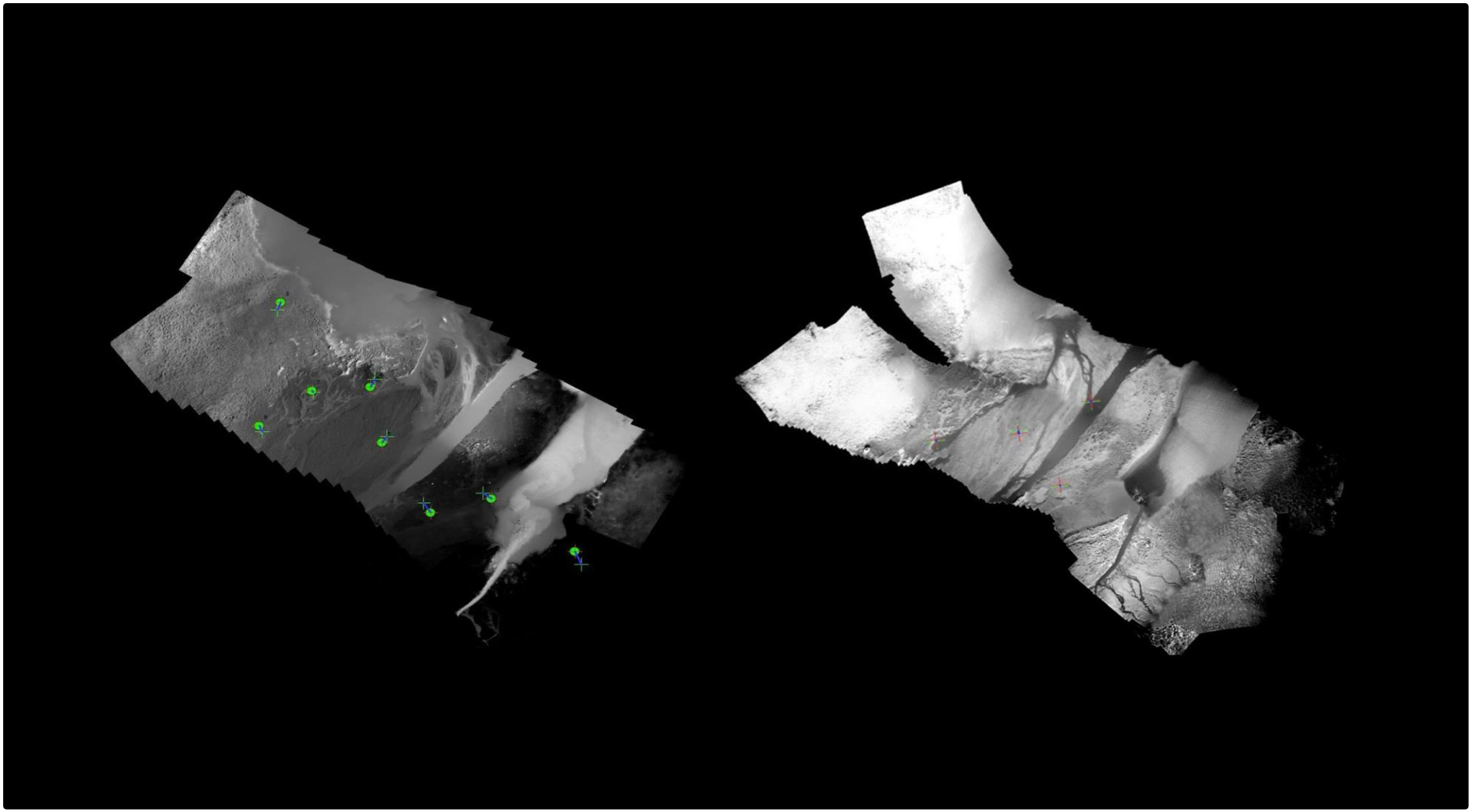
Το πρώτο φωτομωσαϊκό της πρωινής μέτρησης, διορθώθηκε πραγματοποιώντας αφινικό μετασχηματισμό με συνολικό σφάλμα (Total RMS Error) 0,628 m. Στο δεύτερο μωσαϊκό της μεσημεριανής πτήσης, έγινε σχετική διόρθωση με βάση τόσο των πυρσών όσο και κοινών σημείων με το μωσαϊκό της πρωινής καταγραφής. Η διόρθωση αυτή πραγματοποιήθηκε επίσης, χρησιμοποιώντας αφινικό μετασχηματισμό και το συνολικό της σφάλμα είναι 0,251 m. Παρακάτω παραθέτονται τα σημεία των πυρσών σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων (Πίνακας 7.1) και ακολουθούν οι διορθωμένες εικόνες (Σχήμα 7.6).

Πίνακας 7.1: Πίνακας με την ακριβή θέση των φωτοσταθερών σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

| A/A | X | Y | H |
|---|---|---|---|
| **1** | 1033.887 | 1005.152 | 99.291 |
| **2** | 1013.027 | 1003.985 | 99.100 |
| **3** | 1024.354 | 1011.618 | 99.017 |
| **4** | 1017.393 | 1009.923 | 99.425 |
| **5** | 1011.895 | 1018.535 | 98.959 |
| **6** | 1010.568 | 1025.322 | 99.820 |
| **7** | 1003.854 | 1024.863 | 99.388 |
| **8** | 1000.315 | 1035.706 | 99.473 |
| **9** | 997.851 | 1020.582 | 99.589 |
| **10** | 1010.415 | 1002.245 | 99.527 |



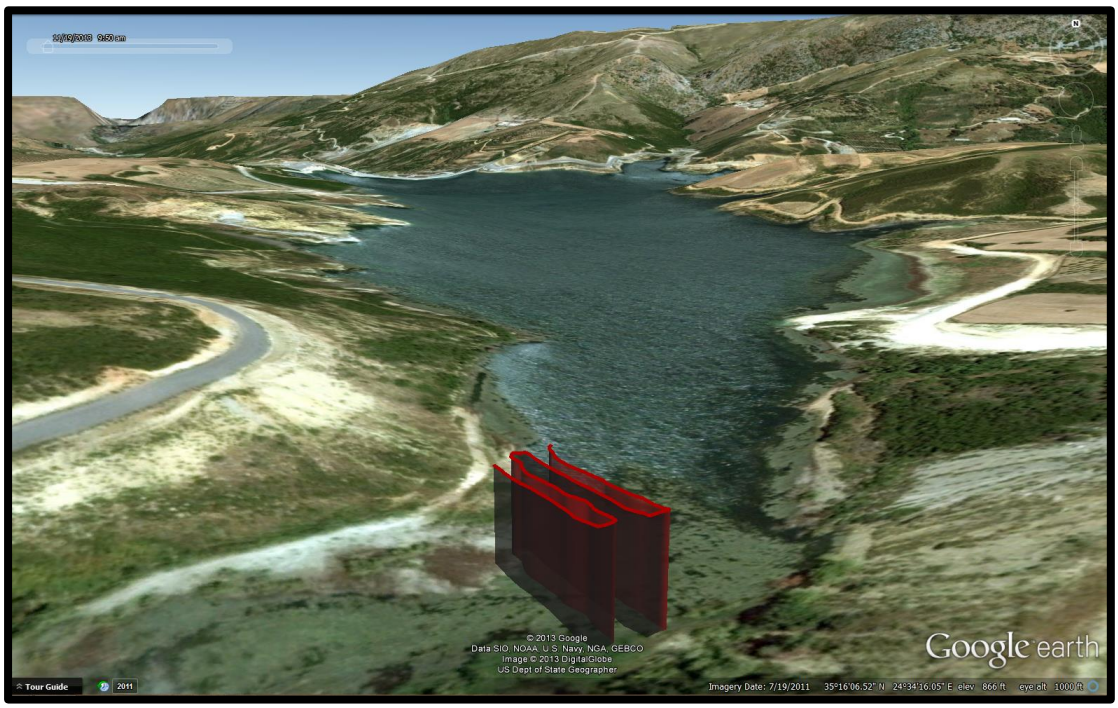

Σχήμα 7.6: Η θέση των φωτοσταθερών στο χώρο σε σχέδιο AutoCad.



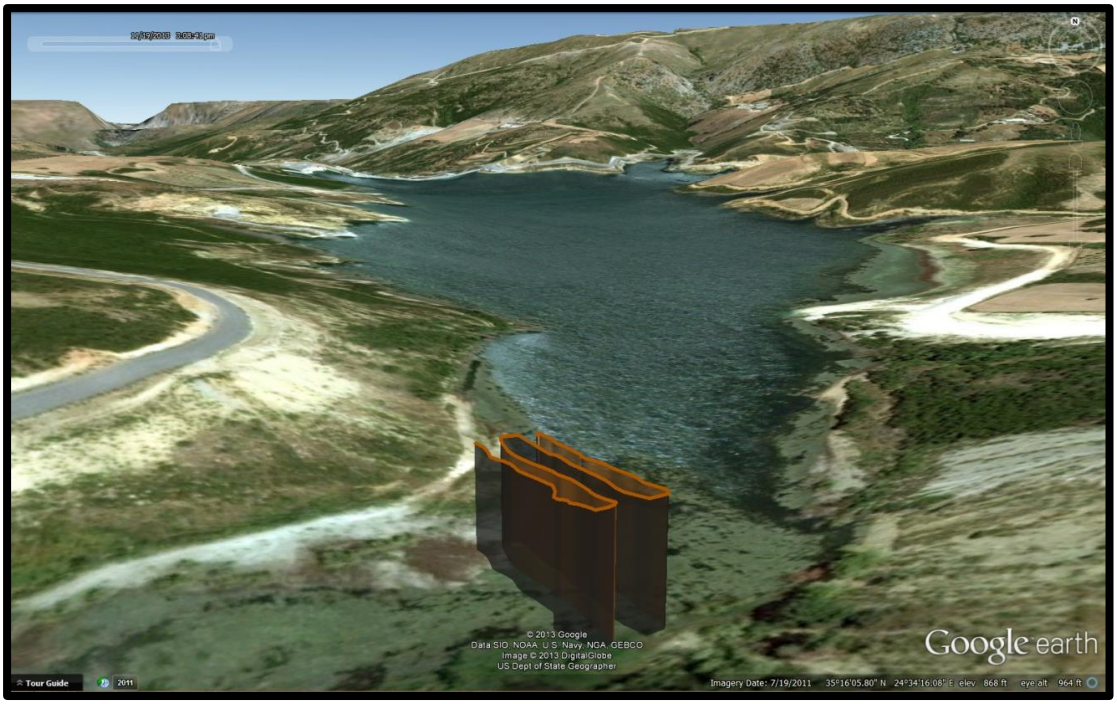
Σχήμα 7.7: Τα δύο μωσαϊκά μετά την γεωμετρική διόρθωση σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

## 7.3 Επεξεργασία των στοιχείων πτήσης (Data Logs) του αυτομάτου πιλότου

Τελικό στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων είναι η ανάλυση των στοιχείων της πτήσης στον υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, ο αυτόματος πιλότος σε κάθε πτήση καταγράφει όλα τα δεδομένα σε ένα αρχείο στον υπολογιστή. Μετά το πέρας των πτήσεων ελήφθησαν τα αρχεία αυτά, ένα για την πρωινή και ένα για την μεσημεριανή πτήση, επεξεργάστηκαν και μετατράπηκαν σε αρχεία *kmz, τα οποία μπορούν να απεικονιστούν στο Google Earth. Ακολουθούν δυο φωτογραφίες, η πρώτη για το πρωί και η δεύτερη για το μεσημέρι με το ίχνος της πορείας του εξακόπτερου κατά την πτήση. (Σχήμα 7.7 και 7.8) Διακρίνεται με ευκολία ο ορθογωνικός κάνναβος που κατασκευάστηκε σε ύψος πτήσης 24 m από το έδαφος. Στους χάρτες αυτούς διακρίνεται η θέση της περιοχής μελέτης σε σχέση με την περιοχή του ταμιευτήρα. Τέλος αξίζει να αναφερθεί, ότι στην δεύτερη πτήση, αισθητή κάνει την παρουσία του ο αυξημένος άνεμος λόγω μικρής απόκλισης του ίχνους της πορείας, ο οποίος έφθανε μέχρι και σε ριπές τα 20 km/h.




Σχήμα 7.8: Το ίχνος της πορείας από το GPS του αυτομάτου πιλότου κατά την πρωινή πτήση σε χάρτη Google Earth, περιοχή συνολικά 1.200 $m^2$.




Σχήμα 7.9: Το ίχνος της πορείας από το GPS του αυτομάτου πιλότου κατά την μεσημεριανή πτήση σε χάρτη Google Earth, μπορεί να διακριθεί η απόκλιση του ίχνους σε μερικά σημεία λόγω αύξησης της ταχύτητας του ανέμου.

## 7.4 Συμπεράσματα

Κατά το Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της θερμικής καταγραφής στον υπολογιστή. Αρχικά δημιουργήθηκαν τα δυο μωσαϊκά, ένα για την πρωινή και ένα για την μεσημεριανή καταγραφή, όπου στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε γεωμετρική διόρθωση σε τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Το σφάλμα της διόρθωσης αυτής, είναι 0,628 m για την πρωινή θερμική καταγραφή και 0,251 m για την μεσημεριανή θερμική καταγραφή. Τέλος, η επιλογή για το τοπικό σύστημα αναφοράς έγινε για λόγους ευκολίας. Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας των μωσαϊκών αυτών.

# Κεφάλαιο 8: Ερμηνεία αποτελεσμάτων

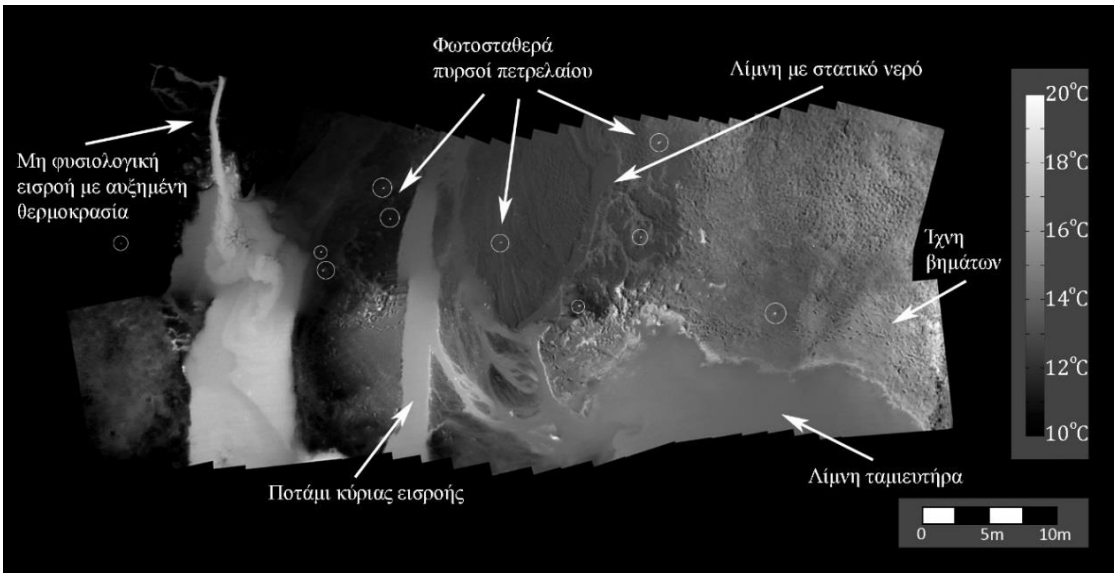
Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει ερμηνεία των μωσαϊκών που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Τα μωσαϊκά καλύπτουν την περιοχή μελέτης, η οποία είναι περίπου 1.200 $m^2$. Οι εικόνες που αποτελούν το κάθε μωσαϊκό, παρουσιάζουν διακύμανση της κλίμακας του γκρι και λαμβάνουν τιμές από 0 – 255. Χαμηλές τιμές φωτεινότητας (σκούρο χρώμα, τιμές φωτεινότητας κοντά στο μηδέν) αντιστοιχούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ υψηλές θερμοκρασίες απεικονίζονται με έντονα λευκό χρώμα (τιμές φωτεινότητας κοντά στο 255). Αρχικά παρουσιάζεται η ερμηνεία του μωσαϊκού πρωινής καταγραφής, στη συνέχεια αυτή του μωσαϊκού των εικόνων που λήφθηκαν το μεσημέρι και το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

## 8.1 Ερμηνεία μωσαϊκού πρωινής θερμικής καταγραφής

Κατά την συγκεκριμένη καταγραφή το εύρος θερμοκρασιών που ρυθμίστηκε στο πρόγραμμα ήταν $10^o$ – $20^o$ C. Έτσι τα νούμερα της κλίμακας του γκρι που αναφέραμε παραπάνω μετασχηματίζονται σε θερμοκρασίες με τον εξής τρόπο:

Πίνακας 8.1: Πίνακας με τις μετρούμενες θερμοκρασίες της πρωινής θερμικής καταγραφής.

| Τιμή του γκρι | Θερμοκρασία |
|---|---|
| 0 | ≤$10^o$ C |
| 255 | ≥$20^o$ C |




Σχήμα 8.1: Απεικόνιση της ερμηνείας στο μωσαϊκό της πρωινής καταγραφής.

Αρχικά στο κέντρο της εικόνας φαίνεται το ποτάμι της κύριας εισροής του ταμιευτήρα. Το νερό αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί προέρχεται από το φαράγγι του Αγίου Αντωνίου, το ρέμα

«Κεφαλοβρύσσα» και με τις διακλαδώσεις που φαίνεται ότι δημιουργεί καταλήγει στην λίμνη του ταμιευτήρα. Η θερμοκρασία του νερού αυτού φαίνεται διαφορετική από την θερμοκρασία της γύρω περιοχής. Ακριβώς δίπλα από το ποτάμι φαίνεται ένα ακόμα ρυάκι, το οποίο ξεκινάει από μια μικρή λίμνη. Η θερμοκρασία του νερού αυτού φαίνεται να είναι ίδια με αυτή του εδάφους, διότι το νερό αυτό δεν κινείται, είναι στατικό. Η θερμοκρασία αυτή λοιπόν είναι αυτή που αποκτήθηκε κατά την διάρκεια της νύχτας.

Στο δεξί μέρος του φωτομωσαϊκού διακρίνεται η όχθη της λίμνης λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Το νερό όπως αναφέραμε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, έχει την μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Φαίνεται λοιπόν, ότι η λίμνη έχει αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με το έδαφος κατά την πρωινή θερμική καταγραφή. Ακριβώς πάνω από την όχθη παρατηρούνται τα ίχνη των βημάτων που έγιναν για την τοποθέτηση των φωτοσταθερών στην περιοχή. Επιπροσθέτως, στην καταγραφή αυτή διακρίνονται καθαρά τα άσπρα στίγματα τα οποία είναι τα αυτοσχέδια φωτοσταθερά (πυρσοί πετρελαίου), που τοποθετήθηκαν μέσα στην περιοχή μελέτης για την γεωμετρική διόρθωση του μωσαϊκού.

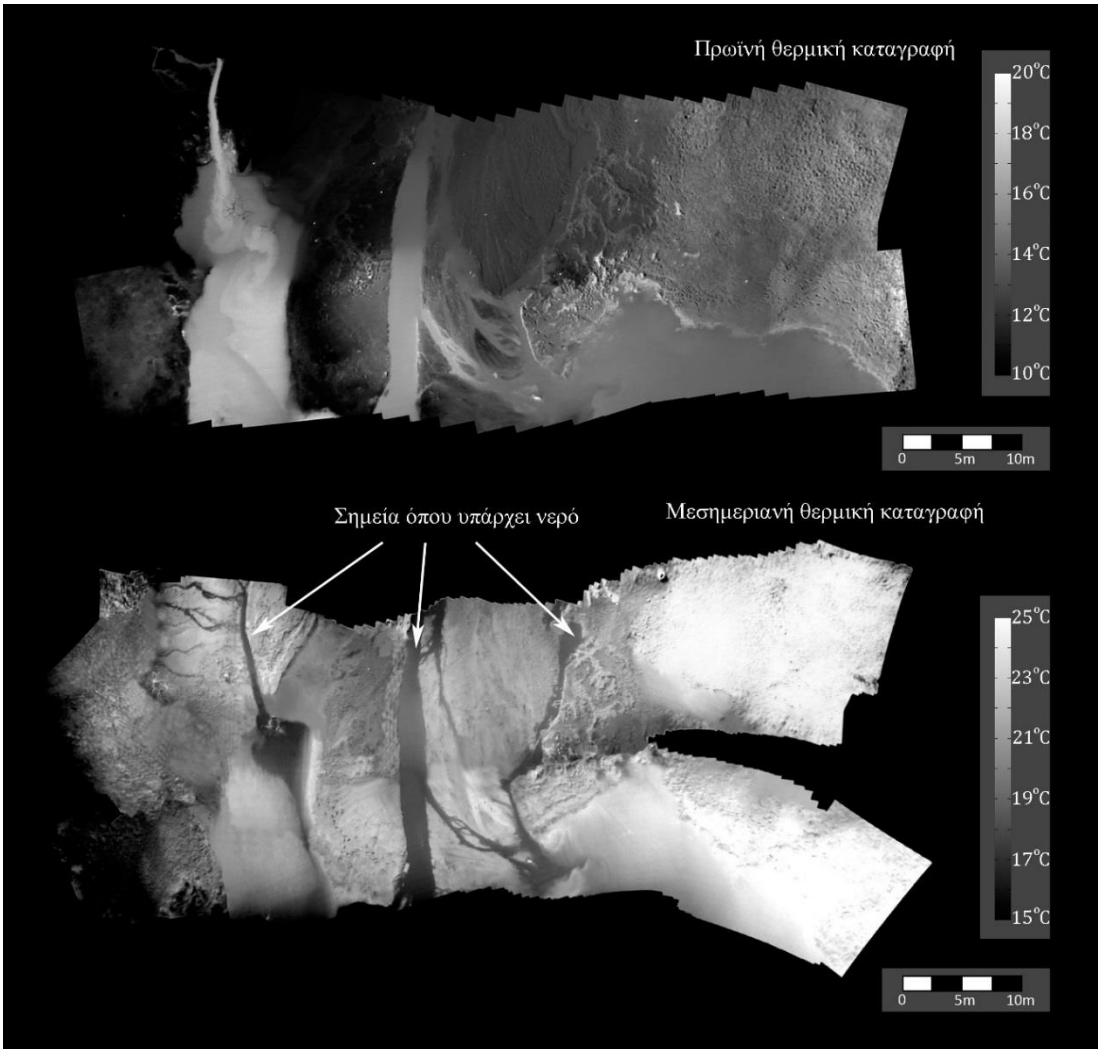
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δείχνει το αριστερό μέρος της εικόνας, στο οποίο έχει καταγραφεί ένα μικρό ρυάκι εισροής με άσπρο χρώμα. Αυτό το χρώμα αντιστοιχεί σε αρκετά αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή. Μια τάξη μεγέθους που μπορεί να δοθεί σύμφωνα με τον πίνακα 8.1 και την κλίμακα που υπάρχει στο Σχήμα 7.2 (Κεφάλαιο 7) είναι ότι το άσπρο αυτό χρώμα αντιστοιχεί σε θερμοκρασίες από $18^{o} – 20^{o}$ C. Οι θερμοκρασίες αυτές δεν είναι λογικές για την ώρα της θερμικής καταγραφής και αποτελεί θερμική μόλυνση. Η περιοχή αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί εκτενέστερα, με σκοπό να εξηγηθεί ο λόγος της αυξημένης θερμοκρασίας την συγκεκριμένη πρωινή ώρα. Το ρυάκι αυτό σύμφωνα με την οπτική εικόνα (Σχήμα 7.4 Κεφαλαίου 7) φαίνεται ότι προέρχεται από το πόδι ενός πρανούς της περιοχής.

## 8.2 Ερμηνεία μωσαϊκού μεσημεριανής θερμικής καταγραφής

Κατά την μεσημεριανή θερμική καταγραφή λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας σε σχέση με την πρωινή, το εύρος των μετρούμενων θερμοκρασιών επιλέχθηκε $15^{o} – 25^{o}$ C. Έτσι ο παραπάνω πίνακας (Πίνακας 8.1) στην καταγραφή αυτή μετασχηματίζεται στον παρακάτω :

Πίνακας 8.2: Πίνακας με τις μετρούμενες θερμοκρασίες της μεσημεριανής θερμικής καταγραφής.

| Τιμή του γκρι | Θερμοκρασία |
|---|---|
| 0 | $\leq 15^{o}$ C |
| 255 | $\geq 25^{o}$ C |




Σχήμα 8.2: Σύγκριση των μωσαϊκών της πρωινής και της μεσημεριανής θερμικής καταγραφής.

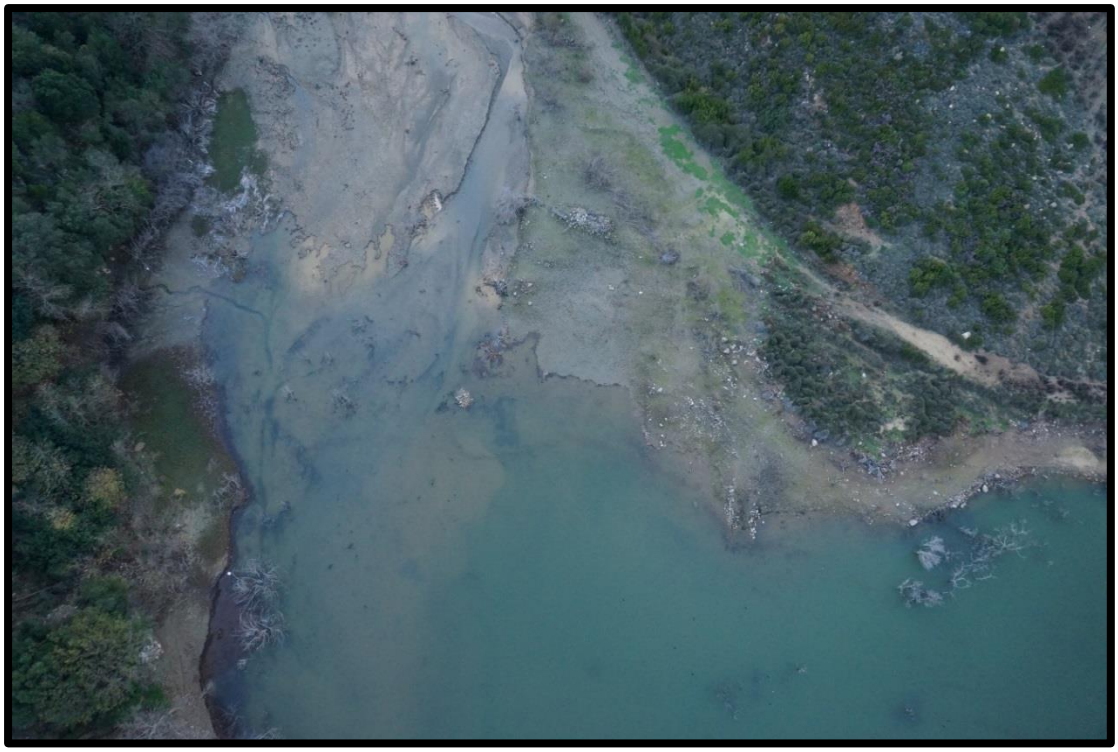
Αρχικά, διακρίνουμε το κενό που υπάρχει στο δεξί μέρος το μωσαϊκού. Αυτό οφείλεται στο ότι το λογισμικό συνένωσης δεν κατάφερε να ενώσει όλες τις εικόνες μεταξύ τους, ίσως γιατί δεν υπήρχε η σωστή επικάλυψη στο σημείο εκείνο. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του ανέμου κατά την πτήση αυτή και στην απόκλιση του ίχνους της πορείας του UAV (Σχήμα 7.8). Έτσι στην περίπτωση αυτή δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικά μωσαϊκά με τις εικόνες που ήταν εφικτό να ενωθούν και στη συνέχεια ενώθηκαν τα δυο αυτά μωσαϊκά χειροκίνητα σε εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων.

Αυτό που κάνει την διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο μωσαϊκό είναι ότι το νερό στην καταγραφή αυτή φαίνεται με μαύρο χρώμα που συνεπάγεται, χαμηλότερης θερμοκρασίας από το έδαφος της υπόλοιπης περιοχής, εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμοχωρητικότητας του νερού αλλά και της μεγαλύτερης ανακλαστικότητάς του. Το νερό έχει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα σε σχέση με το έδαφος, επομένως ανακλά μεγαλύτερο ποσοστό της Η/Μ ακτινοβολίας του ήλιου με αποτέλεσμα να απορροφά λιγότερη θερμική ενέργεια από αυτήν. Με τον τρόπο αυτό

το νερό θερμαίνεται δυσκολότερα σε σχέση με το υπόλοιπο έδαφος, δεδομένης της αύξησης της θερμοκρασίας λόγω μεσημεριού. Έτσι, στο μωσαϊκό αυτό μπορούν να διακριθούν τα σημεία όπου υπάρχει νερό. Φαίνονται λοιπόν με μαύρο χρώμα σύμφωνα με το Σχήμα 8.2, α) το ποτάμι της κύριας τροφοδοσίας και β) το ρυάκι στα δεξιά του, το οποίο στην προηγούμενη (πρωινή) καταγραφή δεν διακρινόταν με ευκολία. Αυτός είναι και ο λόγος που πραγματοποιούνται δυο πτήσεις διαφορετικές ώρες μέσα στην ημέρα, γιατί είναι δυνατόν να αντληθούν διαφορετικά και εξίσου χρήσιμα συμπεράσματα από τις δυο θερμικές καταγραφές. Φαίνεται επίσης γ) το ρυάκι εισροής στα αριστερά, όπου το πρωί φαινόταν με άσπρο χρώμα, να απεικονίζεται στην καταγραφή αυτή μαύρο χρώμα, όπως και τα υπόλοιπα σημεία στα οποία υπάρχει νερό.

## 8.3 Σύγκριση θερμικής καταγραφής με οπτική παρατήρηση 16 ημέρες μετά

Μετά από 16 ημέρες από την θερμική καταγραφή επιλέχθηκε ακόμα μια επίσκεψη στο πεδίο μετρήσεων, αυτή τη φορά μόνο με οπτική κάμερα με σκοπό τον εντοπισμό διαφορών συγκρίνοντάς την με τη μέρα της θερμικής καταγραφής. Έτσι έγινε ξανά πτήση στην περιοχή μελέτης και λήφθηκε η παρακάτω φωτογραφία. (Σχήμα 8.3) Σε αυτήν βλέπουμε ότι η στάθμη της λίμνης έχει αυξηθεί αρκετά με αποτέλεσμα η περιοχή που περπατήθηκε, κατά την ημέρα των πτήσεων της θερμικής καταγραφής, τώρα να έχει καλυφθεί με νερό. Επίσης η «παράξενη» εισροή που παρατηρήθηκε στην θερμική καταγραφή υπάρχει ακόμα στο ίδιο σημείο, με ένα μέρος της τώρα να είναι μέσα στην λίμνη. Με την φωτογραφία αυτή δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για το αν η εισροή αυτή έχει ακόμα την ίδια θερμοκρασία, που είχε την μέρα των λήψεων της θερμικής καταγραφής, παρόλα αυτά όμως θα πρέπει το ζήτημα αυτό να ερευνηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό, για την εξήγηση της εισροής αυτής.



Σχήμα 8.3: Εικόνα της περιοχής μελέτης στο ορατό φάσμα 16 μέρες μετά την θερμική καταγραφή, με σκοπό την αποτύπωση διαφορών.

## 8.4 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, στο Κεφάλαιο αυτό έγινε ερμηνεία των μωσαϊκών που προέκυψαν από τις δυο θερμικές καταγραφές. Στην πρωινή καταγραφή παρατηρήθηκαν οι εισροές νερού στην λίμνη του ταμιευτήρα και μέσα από την μεσημεριανή καταγραφή επαληθεύτηκαν τα σημεία όπου υπήρχε νερό. Επίσης, στην πρώτη καταγραφή εμφανίστηκε μια «παράξενη» εισροή η οποία χρήζει πρόσθετης και εκτενέστερης έρευνας.

# Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, κατασκευάστηκε μια πλατφόρμα μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος και συγκεκριμένα εξακόπτερου, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές του Μηχανικού Ορυκτών Πόρων. Λόγω του δορυφορικού συστήματος εντοπισμού (GPS) και του αυτομάτου πιλότου που διαθέτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία σε εφαρμογές χαρτογράφησης διαφόρων ειδών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόστηκε η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας με τη χρήση θερμικής κάμερας, προσαρμοσμένη στο εξακόπτερο, σε συγκεκριμένη περιοχή μελέτης 1.200 $m^2$ στην νότια ουρά του φράγματος Αμαρίου, Ρεθύμνου. Αποδείχτηκε λοιπόν, πως ο κλάδος των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων μπορεί να αξιοποιήσει και να αναπτύξει ακόμα μια εφαρμογή στον τομέα της χαρτογράφησης.

Παρ' όλα τα προβλήματα και τις δυσκολίες για την υλοποίηση της κατασκευής του πρωτότυπου αλλά και της πραγματοποίησης των μετρήσεων πεδίου, δημιουργήθηκαν δυο μωσαϊκά στο θερμικό φάσμα ως αποτέλεσμα της εργασίας αυτής. Αυτό που έκανε ιδιαίτερη εντύπωση είναι η «παράξενη» εισροή με αυξημένη θερμοκρασία σε σχέση με το υπόλοιπο έδαφος στο μωσαϊκό της πρωινής καταγραφής. Η περιοχή αυτή στην ουρά του φράγματος, θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με σκοπό να εξηγηθεί ο λόγος της αυξημένης θερμοκρασίας στο σημείο εκείνο. Επίσης, θα ήταν εξίσου χρήσιμη η μελέτη ολόκληρης της περιφέρειας του ταμιευτήρα καθώς, μπορούν να εντοπιστούν και άλλα χρήσιμα δεδομένα, που πιθανόν να μην μπορούν να εντοπιστούν με τις οπτικές παρατηρήσεις. Η μέθοδος της θερμογραφίας μπορεί να δώσει σημαντικά αποτελέσματα σε έναν τόσο σπουδαίο υδροβιότοπο.

Όσον αφορά το μη επανδρωμένο εναέριο μέσο -εξακόπτερο-, το οποίο θα παραμείνει στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης μπορεί να αποτελέσει πηγή ενδιαφέροντος και για άλλους φοιτητές και να δώσει το έναυσμα για περαιτέρω εξέλιξη της πλατφόρμας αυτής, τόσο σε επίπεδο εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Επίσης μπορούν να ερευνηθούν κι άλλες εφαρμογές στις οποίες μπορεί να ανταπεξέλθει η συγκεκριμένη πλατφόρμα, διευρύνοντας έτσι τον κλάδο των μη επανδρωμένων στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ακολουθεί αναμνηστική φωτογραφία από την ημέρα της διεξαγωγής των μετρήσεων στο φράγμα Αμαρίου (Σχήμα 9.1).



Σχήμα 9.1: Αναμνηστική φωτογραφία μετά το πέρας της διεξαγωγής των μετρήσεων στην ουρά του φράγματος Αμαρίου. Από τα αριστερά προς τα δεξιά: Παναγιώτης Παρτσινέβελος (Επίκουρος καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης), Αχιλλέας Τριπολιτσιώτης (Επιστημονικός Συνεργάτης Πολυτεχνείου Κρήτης), Ορέστης Καραμάνος, Παναγιώτης Ζερβός, Βασίλης Σιμιτζής (Γεωλόγος του Ο.Α.ΔΥ.Κ), δύο φοιτητές σε πρακτική άσκηση στον Ο.Α.ΔΥ.Κ. από πανεπιστήμιο της Ιταλίας.

# Βιβλιογραφία


### Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ. Γ. και Μερτίκας, Σ. Π. (2003). Ένας πρακτικός οδηγός για την Συγγραφή Τεχνικών Κειμένων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Καρτάλης, Κ. και Φείδας, Χ. (2006). Αρχές και εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Εκδόσεις Β. Γκιούρδας, Αθήνα.
3. Κορωναίος Αιμ. Γ. και Σαργέντης Γ. Φ. (2003). Διερεύνηση των δυνατοτήτων της θερμογραφίας στην θερμική συμπεριφορά των κτηρίων, Δημοσιεύσεις Εργαστηρίου Τεχνικών Υλικών, Αθήνα.
4. Μερτίκας, Σ.Π. (2009). Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
5. Ο.Α.ΔΥ.Κ. (1990). Προμελέτη και οριστική μελέτη φράγματος Ποταμών – Αμαρίου Ρεθύμνης, Γεωλογική – Υδρογεωλογική έκθεση, Αθήνα.
6. Ο.Α.ΔΥ.Κ. (2013). Αρχείο χαρτών, εικόνων από προσωπική συνάντηση, Ρέθυμνο, Κρήτης.

### Διεθνής βιβλιογραφία

1. Agarwala, A., Dontcheva, M., Drucker, S., Colburn, A., Curless, B., Salesin, D. and Cohen, M, (2004). Interactive digital photomontage, Proc. ACM SIGGRAPH, New York, U.S.A., pp. 294-302.
2. Azom.com Staff Writers, (2014). [online] Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) – Overview, History and Market, available from: http://www.azom.com [accessed 20/02/2014].
3. Bendea, H., Chiabrando, F., Giulio Tonolo, F. and Marenchino, D. (2007). Mapping of Archaelogical Areas Using a Low-Cost UAV the Augusta Bagiennorum Test Site, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece.
4. Boykov, Y. Y. and Jolly, M. P. (2001). Interactive Graph Cuts for Optimal Boundary & Region Segmentation of Objects in N-D Images, Proc. International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, Vol. I, pp. 105-112.
5. Bristeau, P., Callou, F., Vissiere, D. and Petit, N. (2011). The Navigation and Control technology inside the AR.Drone micro UAV, Proc. IFAC World Congress, Milano, Italy.
6. Casbeer, D. W., Kingston, D. B., Beard, R. W. and McLain, T. W., (2005). Cooperative Forest Fire Surveillance Using a Team of Small Unmaneed Air Vehicles, International Journal of Systems Science, Vol. 00, No. 00, pp. 1-18.

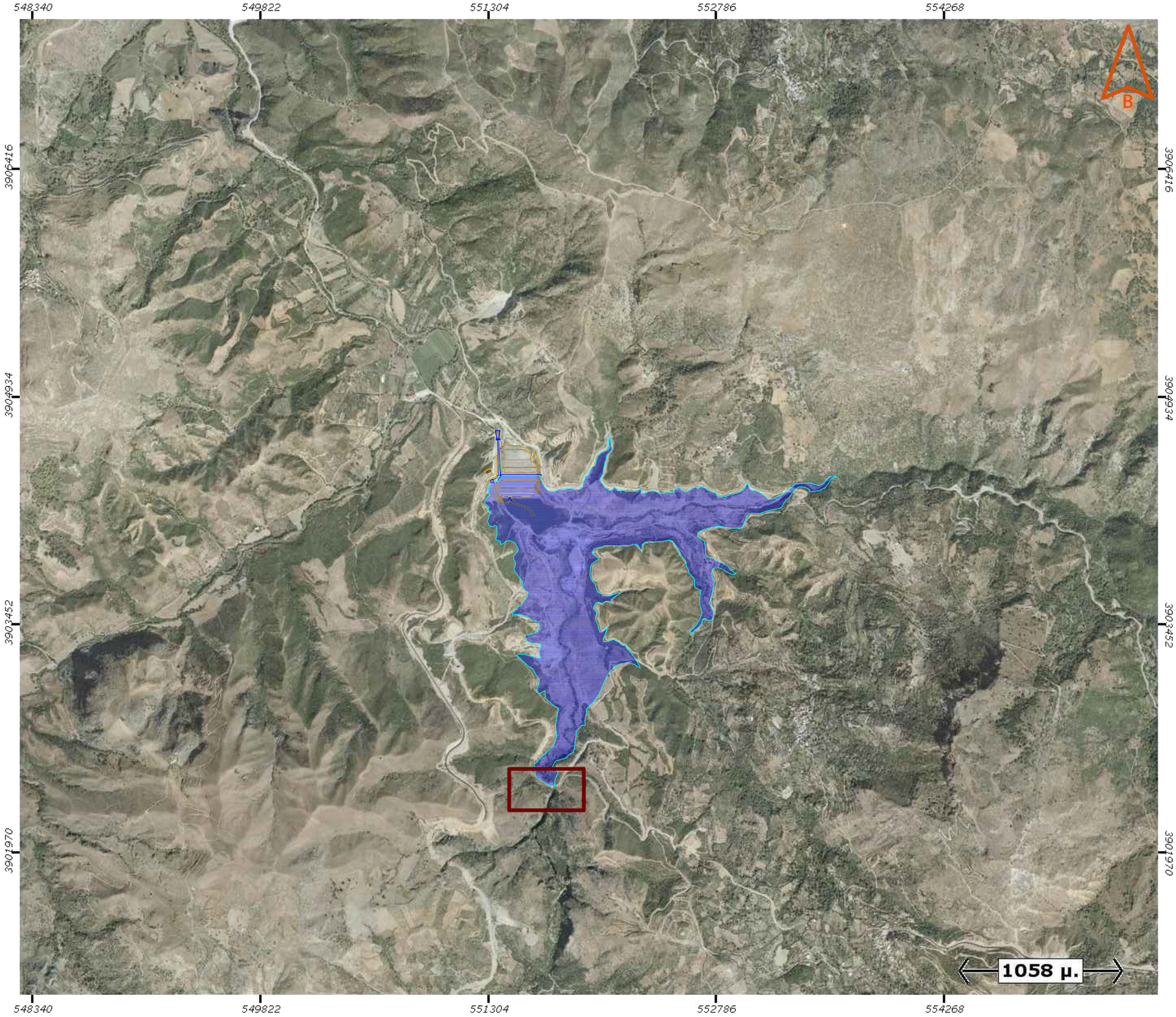
7. Chao, H., Cao, Y. and Chen, Y. Q. (2010). Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles: A Survey, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 36-44.
8. Eisenbeiss, H. (2004). A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition, Proc. ISPRS, Pitsanulok, Thailand.
9. Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. Doctor of Sciences degree. ETH, Zurich, Switzerland.
10. Eisenbeiss, H. and Sauerbier, M. (2011). Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. The Photogrammetric Record, Vol. 26, No. 136, pp. 400-421.
11. Fahmy, M. and Moselhi, O. (2009). Detecting and locating leaks in Underground Water Mains Using Thermography, Proc. ISARC, Austin TX, U.S.A.
12. Farbman, Z., Hoffer, G., Lipman, Y., Cohen-Or, D. and Lischinski, D. (2009). Coordinates for instant image cloning, Proc. ACM SIGGRAPH, New York, U.S.A.
13. Flir Systems, Inc. (2013). [online] Thermal Imaging for Science / R&D A315, available from: http://www.flir.com [accessed 15/07/2013].
14. Hanford, S. D., Long, L. N. and Horn, J. F. (2005). A small Semi-Autonomous Rotary-Wing Unmanned Air Vehicle (UAV), Proc. AIAA Conference, Lake Tahoe, California pp. 2005-7077.
15. Harwin, S. and Lucieer, A. (2012). Assessing of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imaginery, MDPI Remote Sens., Hobart, Australia, Vol. 4, No. 6, pp. 1573-1599.
16. How, J., King, E. and Kuwata, Y. (2004). Flight Demonstrations of Cooperative Control for UAV Teams, Proc. AIAA Conference, Chicago, Illinois, pp. 2004-6490.
17. HowStuffWorks, Inc. (2014). [online] How the MQ-9 Reaper Works, by Tom Scheve, available from: http://www.howstuffworks.com/reaper1.htm [accessed 20/02/2014].
18. Hruska, R., Mitchell, J., Anderson, M. and Glenn, N. F. (2012). Radiometric and Geometric Analysis of Hyperspectral Imagery Acquired from an Unmanned Aerial Vehicle, MDPI Remote Sens., Boise, U.S.A., Vol. 4, No. 9, pp. 2736-2752.
19. Skoglar, P., Orguner, U., Tornqvist, D. and Gustafsson, F. (2012). Road Target Search and Tracking with Gimballed Vision Sensor on an Unmanned Aerial Vehicle, MDPI Remote Sens., Linkoping, Sweden, Vol. 4, No. 7, pp. 2076-2111.
20. Stefanakis, D., Hatzopoulos, J. N., Margaris, N. and Danalatos, N. (2013). Creation of a Remote Sensing Unmanned Aerial System (UAS) for Precision Agriculture and Related Mapping Applications, Proc. ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland.

21. Turner, D., Lucieer, A. and Watson, C. (2012). An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds., MDPI Remote Sens., Hobart, Australia, Vol. 4, No. 5, pp. 1392-1410.
22. Valavanis, K. P. and Kontitsis, M. (2007). A Historical Perspective on Unmanned Aerial Vehicles, Springer, Netherlands, Vol. 33, pp. 15-46.
23. Valavanis, K. P. (2007). Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy. Springer.
24. Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. and Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR with Application to Forest Inventory, MDPI Remote Sens., Hobart, Australia, Vol. 4, No. 6, pp. 1519-1543.
25. Watts, A. C., Ambrosia, V. G. and Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use, MDPI Remote Sens., Basel, Switzerland, pp. 1671-1692.

# Παράρτημα

# Χάρτης

# Ευρύτερης περιοχής φράγματος Αμαρίου


548340
549822
551304
552786
554268
3905416
3904934
3903452
3901970
B
1058 μ.

# Χάρτης

# Γεωλογικός – Υδρογεωλογικός

# λεκανών απορροής

ΚΡΗΤΙΚΟΝ ΠΕΛΑΓΟΣ

ΡΕΘΥΜΝΟΝ

# ΥΠΟΜΝΗΜΑ

## ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

Προσχώσεις αμμοχαλικώδεις

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

K-μ — Ασβεστόλιθοι μαργαϊκοί, ψαλογενείς, οργανομειγείς

GW-μ — Κροκαλοπαγή μετρίως συνδεδεμένα με αμμοζύλ και με παρεμβολές ψαμμιτών και ιλυολίθων

ml-μ — Ιλυόλιθοι-μάργες με λεπτές παρεμβολές λιγνίτη

ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

I. ΑΛΛΟΧΘΟΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

1. ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

οΦ — Οφιόλιθοι, περιδοτίτες, τοπικά σερπεντινιμένοι (Οφιολιθικό κάλυμμα)

γν — Γνεύσιοι και αμφιβολίτες (Κάλυμμα Αστερουσίων)

φλ-τ — Σχιστόλιθοι Βατού. Εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών και ασβεστολιθικών ψαμμιτών (Κάλυμμα Βατού)

2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ

2.1 Ζώνη Ηλανού-Πενδού

φλ-ο — Φλυσχης ψαμμιτικός-ιλυολιθικός

K-ο — Ασβεστόλιθοι λεπτο έως μεσοστρωματώδεις του Αν. Σενάντου-Παλαιόκαινου

2.2 Ζώνη Τριπόλεως

K-rp — Ασβεστόλιθοι παχυστρωματώδεις του Αν.Τριαδικού – Αν. Ιουρασικού

sh-rp — Αργιλικός σχιστόλιθοι ελαφρώς μεταμορφωμένοι (Λαδσνιο-Κάρνιο)

2.3 Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά

ph-qu — Εναλλαγή σερικιτικών, μαρμαρυγιακών και χλωριτικών σχιστολίθων και φυλλιτών με ημιμεταμορφωμένους ψαμμίτες και χαλαζίτες. Τοπικά λεπτές ενστρώσεις γραφιτών καθώς και παρεμβολές σωμάτων από ασβεστόλιθους και δολομίτες

Γενικά αδιαπέρατοι. Τοπικά μόνο και κυρίως στην επιφανειακή ζώνη ημιπερατοί λόγω κερματισμού

II. ΙΟΝΙΟΣ ΖΩΝΗ

K-v — Ασβεστόλιθοι και δολομίτες μεσοζωϊκοί, γνωστοί ως "Platten Kalk"

Υδροπερατοί λόγω κερματισμού και κυρίως αποκαρστίωσης

— — Γεωλογικά όρια

40 — Διεύθυνση και κλίση στρώσης ή σχιστότητας

Τεκτονική επαφή – Ρήγμα

Επώθηση – Εφίππευση

Θέση φράγματος

## ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ

Υδροπερατές. Τροφοδοτούνται από άμεση διήθηση και από διήθηση κατά μήκος της κοίτης

Υδροπερατός ανάλογα με τον βαθμό κερματισμού και αποκαρστίωσης. Τροφοδοτούνται από την άμεση διήθηση

Ημιπερατά. Τροφοδοτούνται κυρίως από την άμεση διήθηση

Αδιαπέρατες.

Σχεδόν αδιαπέρατοι. Τοπικά ημιπερατοί ανάλογα με τον βαθμό κερματισμού

Αδιαπέρατοι.

Αδιαπέρατοι

Αδιαπέρατος

Υδροπερατός λόγω κερματισμού και απορρατίσωσης

Υδροπερατός λόγω κερματισμού και (κυρίως) αποκαρστίωσης

Αδιαπέρατοι

Όρια υδροκρίτη

Πηγή

ΥΓ — Υδρογεώτρηση

Φ — Πηγάδι

Γραμμή ροής υπόγειων υδάτων

1 — Υδρογεωλογική υπολεκάνη

ΑΝΤΙΓΡΑΦΟΝ Γ' 4

**Ο.Α.ΔΥ.Κ.** ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΕΩΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΟΤΑΜΩΝ-ΑΜΑΡΙΟΥ ΡΕΘΥΜΝΗΣ

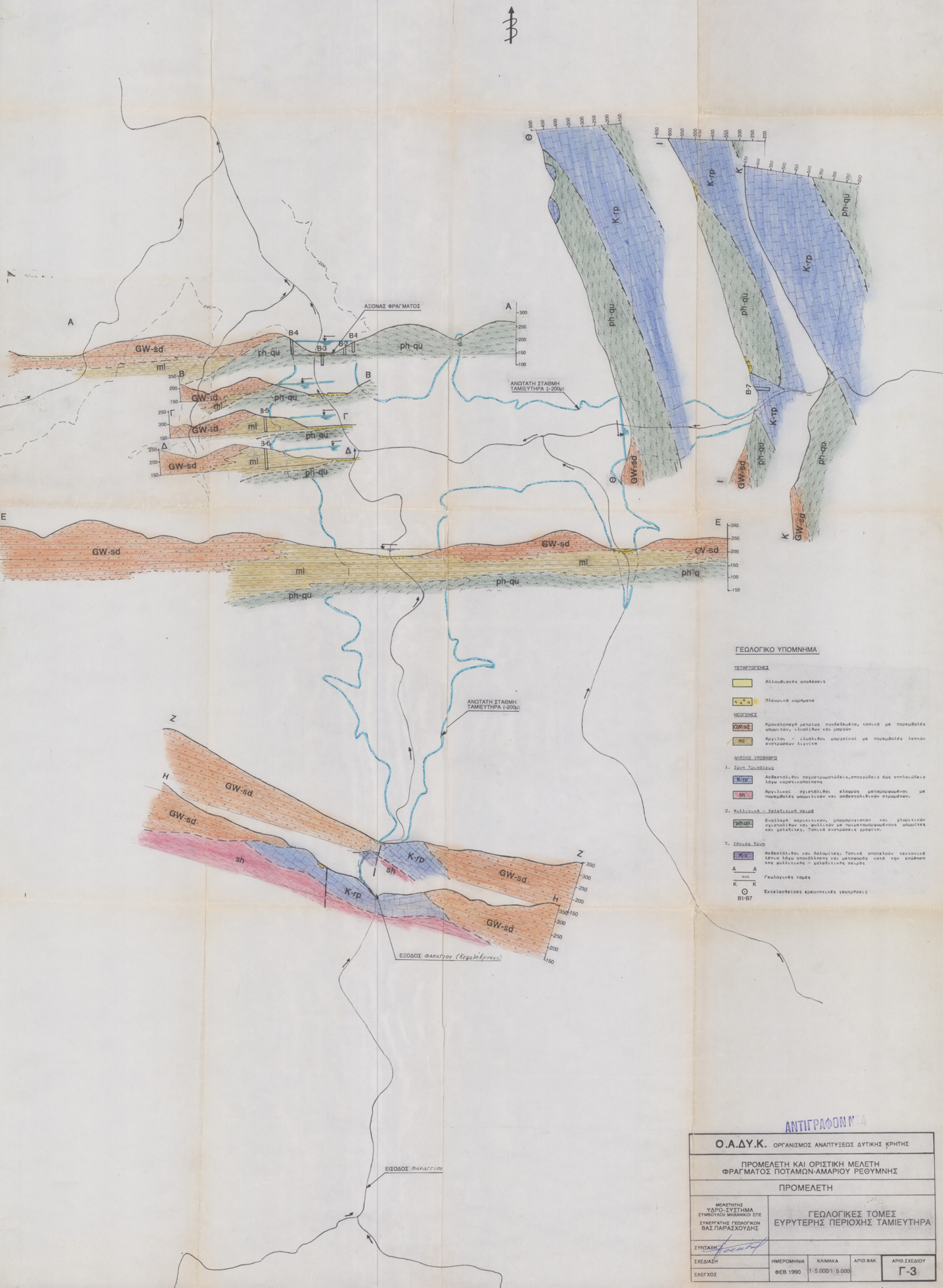
ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ

| | |
|---|---|
| ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ<br>ΥΔΡΟ-ΣΥΣΤΗΜΑ<br>ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ<br>ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ<br>ΒΑΣ.ΠΑΡΑΣΧΟΥΔΗΣ | ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ-ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ |
| ΣΥΝΤΑΞΗ | |

| ΣΧΕΔΙΑΣΗ | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΚΛΙΜΑΚΑ | ΑΡΙΘ.ΦΑΚ. | ΑΡΙΘ.ΣΧΕΔΙΟΥ |
|---|---|---|---|---|
| ΕΛΕΓΧΟΣ | ΦΕΒ.1990 | 1:50.000 | | Γ-4 |

# Χάρτης

# Γεωλογικών τομών ευρύτερης περιοχής ταμιευτήρα




## ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

- Αλλουβιακές αποθέσεις
- Πλευρικά κορήματα

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

- GW-sd: Κροκαλοπαγή μετρίως συνδεδεμένα, τοπικά με παρεμβολές ψαμμιτών, ιλυολίθων και μαργών
- ml: Αργιλοι - ιλυόλιθοι μαργαϊκοί με παρεμβολές λεπτών ενστρώσεων λιγνίτη

ΑΛΠΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1. Ζώνη Τριπόλεως
   - K-rp: Ασβεστόλιθοι παχυστρωματώδεις, σπογγώδεις έως σπηλαιώδεις λόγω καρστικοποίησης
   - sh: Αργιλικός σχιστόλιθοι ελαφρώς μεταμορφωμένοι με παρεμβολές ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών στρωμάτων.
2. Φυλλιτικά - Χαλαζιτική σειρά
   - ph-qu: Εναλλαγή σερικιτικών, μαρμαρυγιακών και χλωριτικών σχιστολίθων και φυλλιτών με πυριμεταμορφωμένους ψαμμίτες και χαλαζίτες. Τοπικά ενστρώσεις γραφίτη.
3. Ιόνιος ζώνη
   - K-v: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Τοπικά αποτελούν τεκτονικά λέπια λόγω αποκόλλησης και μεταφοράς κατά την επώθηση της φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς

A — A: Γεωλογικές τομές

K — K

B1-B7: Εκτελεσθείσες ερευνητικές γεωτρήσεις

ΑΝΤΙΓΡΑΦΟΝ Ν°4

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Ο.Α.ΔΥ.Κ.** ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΕΩΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ | | | | |
| ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΟΤΑΜΩΝ-ΑΜΑΡΙΟΥ ΡΕΘΥΜΝΗΣ | | | | |
| ΠΡΟΜΕΛΕΤΗ | | | | |
| ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ ΥΔΡΟ-ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΠΕ<br>ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΒΑΣ.ΠΑΡΑΣΧΟΥΔΗΣ | ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ | | | |
| ΣΥΝΤΑΞΗ | | | | |
| ΣΧΕΔΙΑΣΗ | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΚΛΙΜΑΚΑ | ΑΡΙΘ.ΦΑΚ | ΑΡΙΘ.ΣΧΕΔΙΟΥ |
| ΕΛΕΓΧΟΣ | ΦΕΒ.1990 | 1:5.000/1:5.000 | | Γ-3 |