ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Ανίχνευση και εντοπισμός διαρροών στο φράγμα «Ποταμών Αμαρίου Ρεθύμνης» με θερμικές εικόνες.

Διπλωματική εργασία

Μαγδαληνή Κ. Αγγέλη

Εξεταστική Επιτροπή
Στυλιανός Μερτίκας, καθηγητής (επιβλέπων)
Παναγιώτης Παρτσινέβελος, επίκουρος καθηγητής
Διονυσία Κολοκοτσά, επίκουρος καθηγήτρια

Χανιά,
Φεβρουάριος, 2013

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτέλεσε η συμβολή των υπέρυθρων εικόνων στον προσδιορισμό των διαρροών στα τεχνικά έργα. Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι ο προσδιορισμός των διαρροών στο φράγμα «Ποταμών Αμαρίου» στο νομό Ρεθύμνης με θερμικές εικόνες. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα με όγκο ταμιευτήρα $22{,}5 \cdot 10^6$ m^3, και λεκάνη απορροής 60 km^2. Το πρόβλημα εντοπίζεται στην ουρά του φράγματος στη θέση «Αποστολόρεμα», και παρά τις επεμβάσεις δεν έχει αποκατασταθεί πλήρως. Οι απώλειες αυτές δεν θεωρούνται κρίσιμες για την ευστάθεια του έργου, είναι όμως σημαντικές για το σκοπό που το έργο καλείται να εκπληρώσει (άρδευση, υδροηλεκτρικό εργοστάσιο).

Η μέθοδος αυτή, που στηρίζεται στην ερμηνεία των θερμικών εικόνων, επιτρέπει την μείωση του κόστους της παρατήρησης ενός έργου, χωρίς την άμεση επέμβαση σε αυτό. Ακόμη, οι υπέρυθρες εικόνες ευνοούν την χαρτογράφηση βάσει των θερμικών χαρακτηριστικών σε περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες. Μια εφαρμογή της μεθόδου έγινε στο μέτωπο του φράγματος όπου πραγματοποιήθηκε λήψη των εικόνων σε δύο διαφορετικές ώρες της ημέρας. Η επιλογή αυτών των ωρών (6:30 π.μ. και 12:00 μ.μ.) έγινε εξαιτίας των μέγιστων θερμοκρασιακών διαφορών νερού και πετρωμάτων κατά την διάρκεια του ημερήσιου κύκλου. Το νερό εμφανίζει μεγάλη θερμοχωρητικότητα και απεικονίζεται ψυχρότερο την ημέρα και θερμότερο κατά την διάρκεια της νύχτας συγκριτικά με τα πετρώματα.

Η θερμική ακτινοβολία, βασισμένη σε αυτές τις ιδιότητες, είναι ικανή να ανιχνεύσει την υγρασία των πρώτων χιλιοστών της επιφάνειας, και λόγω της αυξημένης ψύξης-εξάτμισης θα αποδώσει χαμηλότερες θερμοκρασίες στις θερμικές εικόνες. Στον κύριο κορμό του φράγματος πραγματοποιήθηκε έλεγχος διαρροών με υπέρυθρη κάμερα χειρός. Επειδή το οπτικό πεδίο της κάμερας ήταν μικρό για την απεικόνιση του μετώπου του φράγματος με μία εικόνα έγινε λήψη έξι εικόνων. Για την γεωμετρική ανόρθωση των εικόνων και τη συννένωσή τους, τοποθετήθηκαν στο μέτωπο συνολικά 11 φωτοσταθερά. Η κάθε εικόνα έχει τέσσερα φωτοσταθερά και επομένως δύο κοινά με την επόμενη τα οποία απεικονίζονται ευκρινώς.

Για την επεξεργασία των εικόνων εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι. Στην πρώτη έγινε κανονικοποίηση και αναγωγή των εικόνων σε επίπεδο χ,y με Autocad βάσει των σημείων

του μετώπου όπου τους είχαν αποδοθεί συντεταγμένες, από τη στατική μέθοδο επίλυσης με μετρήσεις GPS. Στην δεύτερη μέθοδο οι εικόνες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα ArcMap του GIS. Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αφινικός και η λύση δόθηκε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η επανάληψη δειγματοληψίας έγινε με την αναδόμηση εγγύτερου σημείου.

Στην παρούσα διπλωματική αυτές οι μέθοδοι συγκρίνονται και προκύπτει η στεγανότητα του μετώπου του φράγματος. Η θερμοκρασιακή διαφορά (2-3°C) που παρατηρείται στο άνω μέρος του φράγματος σε σχέση με το κάτω οφείλεται στον διαφορετικό όγκο και τη σύσταση των ασβεστολίθων που απαρτίζουν το μέτωπο.

Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να ακολουθηθεί και σε εφαρμογές υπέρυθρου εντοπισμού με λήψεις από αέρος. Η δημιουργία δικτύου σταθερών σημείων (θερμικών στόχων) με ταυτόχρονο προσδιορισμό τους στο κρατικό σύστημα συντεταγμένων κρίνεται σημαντική για την διόρθωση και χαρτογράφηση των υπέρυθρων εικόνων.

Στην περιοχή διαρροών, χρήσιμη είναι η ερμηνεία των υπέρυθρων εικόνων από δορυφόρους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και περιόδους κατά την διάρκεια του έτους, για την παρακολούθηση της πορείας των διαφυγών.

Περίληψη στα Αγγλικά (Abstract)

The purpose of this thesis is to assess the contribution of infrared images to identify leaks in technical construtions. The aim of this study is to identify leaks in the ‘’Amari River Dam "in the Prefecture of Rethymnon with thermal images. It is an earthen dam with a reservoir volume of $22.5 \cdot 10^6$ m^3, and with catchment size 60 km^2. The problem lies in the tail of the dam in place "Apostolorema", and despite the interventions has not been fully restored. These losses are not considered critical for the stability of the dam, but it is important for the purpose of the project is required to fulfill (irrigation, hydroelectric plant).

This method allows the reduction of the observation cost of a constrution project, without direct intervention. Furthermore, the infrared images favor the mapping based on thermal characteristics in areas that are not accessible. An application of the method was in front of the riprap protection where the images were obtained at two different times of the day. These hours (6:30 am and 12:00 pm) had been chosen due to the maximum temperature differences between water and rocks during the daily cycle. The water exhibits high heat capacity and presents cooler during the day and warmer during the night in comparison with the rocks.

Two methods were applied for the image processing. In the first the images were normalized and transferred in the x, y level with Autocad based on the face points where they had been assigned coordinates, with the static method of GPS. In the second method, the images were processed with the program ArcMap GIS. The transformation which was used was affine and the solution was given with the least squares method.

Repeated sampling was rebuilding by nearest point .

In this thesis, these methods are compared and show the tightness of the face dam. The temperature difference (2-3 ^oC) between the top of the dam and the bottom happens because of the different volume and composition of limestones forming the face.

This methodology can be used in applications of infrared tracking shots from a plane. Creating a network of fixed points (thermal targets) with simultaneous determination of the coordinate system of the state is important for the correction and mapping of infrared

images. In the leak area , the interpretation of infrared images from satellites in different times and periods during the year to trace leaks is useful.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία που εκπονείται στα πλαίσια του μαθήματος Τηλεπισκόπηση-Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος έχει ως αντικείμενο τον προσδιορισμό των διαρροών στο φράγμα «Ποταμών Αμαρίου». Η επιλογή του συγκεκριμένου θέματος έγινε καθώς κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των υδατικών πόρων. Στην προσπάθεια αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Στυλιανό Μερτίκα για την συνεχή του καθοδήγηση, και

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω προσωπικές ευχαριστίες στους ανθρώπους του ΟΑΔΥΚ Ρεθύμνου, για την συνεργασία και την συμβολή τους στο τελικό αποτέλεσμα τους κ. Ε. Μαμαγκάκη, (Προϊστάμενος παραρτήματος Ρεθύμνου), και τον κ. Β. Σιμιτζή (Γεωλόγο).

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **2**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ (ABSTRACT) **4**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **6**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **7**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ **9**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ..... **10**

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 10

1.1.1 Στόχος της διπλωματικής *10*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ..... **12**

2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ 12

2.1.1 Μορφολογία της περιοχής *12*

2.1.2 Στρωματογραφία της περιοχής *13*

2.1.3 Περιοχή εδράσεως φράγματος *16*

2.1.4 Περιοχή κοίτης *19*

2.1.5 Τεκτονική *19*

2.1.6 Σεισμικότητα *20*

2.2 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ 22

2.2.1 Μελέτη βροχοπτώσεων *24*

2.2.2 Απορροή-Εξατμισιδιαπνοή-Κατείσδυση *25*

2.2.4 Υδρογεωλογία *27*

2.2.5 Κίνηση των υπόγειων υδάτων *27*

2.2.6 Υδρογεωλογικές λεκάνες *28*

2.3 ΤΥΠΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ 30

2.3.1 Θεμελίωση φράγματος *31*

2.3.2 Στεγάνωση υποβάθρου *31*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... **33**

3.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ 33

3.1.1 Εισαγωγή *33*

3.1.2 Ιστορία της θερμικής υπέρυθρης τηλεπισκόπησης *34*

3.1.3 Θερμικό φάσμα *37*

3.2 Νόμοι της θερμικής ακτινοβολίας *40*

3.2.1 Συντελεστής Εκπομπής *43*

3.2.3 Θερμικές ιδιότητες του εδάφους *44*

3.2.4 Θερμικές υπέρυθρες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις *49*

3.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ 52

3.3.1 Υπέρυθρες κάμερες μέτρησης *53*

3.3.2 Συστήματα FLIR (Forward-Looking Infrared) *55*

3.3.3 Υπέρυθρες κάμερες έναντι κάμερες FLIR *58*

3.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ 63

3.4.1 Λειτουργία ανιχνευτή *63*

3.4.2 Παράμετροι ανιχνευτή *65*

3.4.3 Οπτικοί παράμετροι *68*

3.4.4 Μικροβολόμετρα *70*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ..... **75**
4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ 75
4.1.1Περιγραφή μετρήσεων πεδίου *75*
4.1.2 Στατική μέθοδος GPS *79*
4.1.3 Θερμική διαστρωμάτωση των λιμνών *84*
4.1.4 Θερμική συμπεριφορά υδάτινων μαζών *85*
4.1.4 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας *87*
4.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 94
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ **105**
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **108**

Κατάλογος πινάκων και σχημάτων

Πίνακας 1: Σεισμοί στην περιοχή του Ρεθύμνου, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990 21
Πίνακας 2: Μηνιαία κατανομή βροχοπτώσεων, υδρογεωλογική έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990 24
Πίνακας 3:Σύνολο απορροής λεκάνης φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990 28
Πίνακας 4: Συνολική απορροή για τη λεκάνη του φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990 29
Πίνακας 5: Συνολική κατείσδυση για τη λεκάνη του φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990 30
Εικόνα1: Διάγραμμα της διαδικασίας παρακολούθησης μιας εικόνας στην εξατμισιογραφία. (1)το αντικείμενο προς παρατήρηση (2)φακοί συνήθως υπέρυθροι (3)θάλαμος κενού (4)έξοδος υγρού (Faerman,1963) 34
Εικόνα 2: ιστορική εξέλιξη της υπέρυθρης τεχνολογίας (H.Budzier and G.Gerlach 2011) 36
Εικόνα 3: το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα 38
Εικόνα4: Ατμοσφαιρικοί δίαυλοι στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που παρουσιάζονται είναι πολύ σημαντικοί για την θερμική υπέρυθρη ανίχνευση.(Jensen,2007) 40
Εικόνα 5: το εμβαδόν της περιοχής είναι ίσο με το νόμο του Stefan-Boltzmann. Η θερμοκρασία του στόχου είναι στα 300K. (Holst,2000) 42
Εικόνα 6: Νόμος ακτινοβολίας του Planck με συχνότητα ν. Παράμετρος θερμοκρασία. Οι διακεκομένες γραμμές είναι ο νόμος μετατοπίσεων του Wiens (Budzier ,Gerlach ,2011) 43
Πίνακας 6: θερμικές ιδιότητες διαφόρων υλικών (Μερτίκας,1999) 48
Εικόνα 5: Ο ημερήσιος κύκλος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και της ανακλώμενης μακροκυματικής ενέργειας.β) Η ημερήσια θερμοκρασιακή ακτινοβολία του γυμνού εδάφους, των πετρωμάτων του σκυροδέματος, της βλάστησης, του νερού υγρού γυμνού εδάφους, και μεταλλικών αντικειμένων.(Jensen 2007) 52
Εικόνα 6: Δομή ενός τυπικού υπέρυθρου συστήματος (Rogalski, Chrzanowski 2002) 59
Εικόνα 7: Δομή ενός συστήματοςFLIR (Rogalski, Chrzanowski 2002) 60
Εικόνα 11:Οπτικογεωμετρικές σχέσεις σε μια διάταξη ανιχνευτή (Budzier,Gerlach 2007) 69
Εικόνα11: Δυο βασικά κυκλώματα για τον καθορισμό της αντίστασης βολομέτρου. Α) με φορτίο αντίστασης R_L και σταθερή τάση λειτουργίας β) με σταθερή πηγή ρεύματος I_B (Budzier,Gerlach 2007) 70
Εικόνα 12: Δομή ενός μικροβολομετρικού pixel. (Budzier,Gerlach 2007) 72
Εικόνα13: Εικόνα μιας δομής μικροβολομετρικής γέφυρας α) συνολική εικόνα πολλών εικονοστοιχείων β) λεπτομέρεια της εικόνας ύψος pixel 50μm, ύψος γέφυρας 2.5μm. (courtesy of ULIS, Veurey Voroize, France) 72
Εικόνα 13: Συστήματα στρωμάτων μικροβολομετρικής γέφυρας α) a-Si b)VO_X (Budzier,Gerlach 2007) 74
Εικόνα 14: Υπέρυθρη κάμερα στο σημείο φωτοληψίας 1 *Εικόνα 15: Σταθμός GPS στο σημείο 1* 76
Εικόνα 16: Σταθμός GPS στο μέτωπο του φράγματος *Εικόνα 17: Φωτοσταθερό στο μέτωπο* 77
Εικόνες 18-19: Υπέρυθρες εικόνες την αυγή (αριστερά) και το μεσημέρι (δεξιά) 77
Εικόνες 20-21: Υπερχειλιστής στο ορατό (αριστερά), στο υπέρυθρο (δεξιά) 78
Εικόνες 21-22: πρανές του υπερχειλιστή στο ορατό (αριστερά) και στο υπέρυθρο(δεξιά) 78
Εικόνα 23: Συχρονισμός δορυφορικού χρόνου με χρόνο αναφοράς GPS. 81
Εικόνα 24: Τυπικά σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις GPS 84
Εικόνα 25: θερμική διαστρωμάτωση λίμνης πηγή (kpe-kastor.kas.sch.gr) 86
Εικόνα 26: Επιφανειακή θερμοκρασία νερού την αυγή. 86
Εικόνα 27-28: Επεξεργασία μετρήσεων με το GNSSolutions, χρόνοι παρατηρήσεων κάθε σταθμού. 95
Εικόνα 29: Διανύσματα-βάσεις από τα δύο σημεία φωτοληψίας 96
Εικόνα 30: Επεξεργασία εικόνων στο ορατό με Raster stretch 97
Εικόνα 31: Ορθοκανονικοποίηση των εικόνων στο ορατό με Autocad 98
Εικόνα 32: Γεωμετρική εγγραφή των εικόνων στο υπέρυθρο με Autocad ώρα λήψης 12μμ. 99
Εικόνα 33: Γεωμετρική εγγραφή των εικόνων στο υπέρυθρο με Autocad ώρα λήψης 6:30 πμ 99
Εικόνα 34: Γενική τομή του φράγματος 105
Εικόνα 35: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του φράγματος 106
Εικόνα 36: Αεροφωτογραφία της περιοχής 107

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Η θέση του φράγματος των ΄΄Ποταμών Αμαρίου΄΄ βρίσκεται περί τα 20 km από την πόλη του Ρεθύμνου και 1km κατάντη του οικισμού "Ποταμοί". Από την θέση του φράγματος διέρχεται επαρχιακή οδός που συνδέει το Ρέθυμνο με το Αμάρι και τους Αποστόλους. Η μορφολογική εικόνα της περιοχής του φράγματος είναι ορεινή στη δεξιά πλευρά και λοφώδης στην αριστερή. Πρόκειται για ένα χωμάτινο φράγμα, ύψους 55 m, μήκους στέψης 265 m, πλάτους στέψης 10 m, τελικού πλάτους στη βάση 450 m, όγκου ταμιευτήρα 22,5 $\cdot 10^6$ m^3, και λεκάνη απορροής 60 km^2 με ανώτατη στάθμη αποθηκεύσεως +203,00 m και κατωτάτη στάθμη υδροληψίας +177,00 m.

Η επιλογή του χωμάτινου φράγματος έγινε εξαιτίας της σεισμικότητας της περιοχής και της ανομοιογένειας των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που δομούν το έδαφος έδρασης του φράγματος (σκληροί χαλαζίτες, με μαλακότερους φυλλίτες και μαλακούς γραφιτικούς σχιστόλιθους). Ο σχηματισμός των φυλλιτών-χαλαζιτών που είναι γενικά στεγανός, αποτελεί το υπόβαθρο του ταμιευτήρα. Ο πυρήνας του φράγματος είναι από υλικά της περιοχής (αργιλικά κυρίως), όπως και το κύριο σώμα του φράγματος (κοκκώδη ημιπερατά-υδροπερατά).

1.1.1 Στόχος της διπλωματικής

Στόχος της διπλωματικής είναι η διερεύνηση της συμβολής των υπέρυθρων εικόνων στον προσδιορισμό διαρροών στο φράγμα «Ποταμών Αμαρίου» Ρεθύμνης. Οι ασβεστόλιθοι που εμφανίζονται στα άκρα (ουρές) των δυο κλάδων του ταμιευτήρα είναι σε μεγάλο βαθμό υδατοπερατοί λόγω κερματισμού και αποκαρστίωσης. Οι ασβεστόλιθοι του φαραγγιού ‘’Κεφαλόβρυσσα’’ παρά την υδροπερατότητά τους, δεν δημιουργούν πρόβλημα στεγανότητας, γιατί εδράζονται πάνω σε αδιαπέρατους σχιστόλιθους που κλίνουν προς

τον ταμιευτήρα και έτσι αναγκάζουν τα διηθούμενα νερά να ρέουν υπογείως προς τον ταμιευτήρα και τέλος να ρέουν υπό μορφή πηγών.

Στον λόφο του αριστερού αντερείσματος φάνηκε κατ' αρχήν ότι υπήρχαν κίνδυνοι διαφυγών επειδή περί τα 200 m ανάντη του άξονα, η επαφή των αδιαπέρατων φυλλιτών με τις αποθέσεις του Μειόκαινου βυθίζεται χαμηλότερα από την ανώτατη στάθμη του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα την δυνατότητα διαφυγών προς την κατάντη πλευρική κοιλάδα εάν οι αποθέσεις του Μειόκαινου είναι υδατοπερατές (κροκαλοπαγή).

Το πρόβλημα της στεγανότητας του ταμιευτήρα υπάρχει μόνο στην ουρά του κυρίως χειμάρρου (Αποστολόρεμα), όπου τα νερά του ταμιευτήρα σε μικρό τμήμα έρχονται σε επαφή με καρστικούς υδροπερατούς ασβεστολίθους, οι οποίοι σύμφωνα με την εκτελεσθείσα γεώτρηση συνεχίζουν σε μεγάλο βάθος και οδηγούν διηθούμενα σε αυτούς νερά εκτός ταμιευτήρα.

Η Ελλάδα κατατάσσεται στην τελευταία θέση μεταξύ 24 Ευρωπαϊκών και Μεσογειακών χωρών, στην λειτουργία μεγάλων φραγμάτων, και στην αξιοποίηση υδατικών πόρων. Οι διαρροές αυτές αποτελούν πρόβλημα που απαιτεί άμεση λύση καθώς διοχετεύεται μεγάλη ποσότητα νερού στον κάμπο του Ρεθύμνου για άρδευση των εκτάσεων, και η μείωση της στάθμης θα την καθιστούσε προβληματική. Ακόμα, ο όγκος του ταμιευτήρα αποτελεί τροφοδοσία για τον υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας και υπαγορεύεται η βέλτιστη αξιοποίηση του υδάτινου όγκου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Κεφάλαιο 2

2.1 Περιοχή ταμιευτήρα

2.1.1 Μορφολογία της περιοχής

Η κοιλάδα του ταμιευτήρα χωρίζεται σε δύο κλάδους, το νότιο στο ρέμα Κεφαλόβρυσων και τον ανατολικό στο Αποστολόρεμα οι οποίοι στα 500m περίπου ενώνονται δημιουργώντας μια ενιαία κοιλάδα. Η μορφολογία της περιοχής είναι ορεινή με απότομες κλίσεις των φυσικών πρανών κάτι που συμβάλλει στην γρήγορη αποστράγγιση και δυσχεραίνει την διήθηση στο υπέδαφος ακόμα και στους πιο υδροπερατούς σχηματισμούς.

Η κλίση των πρανών δίνει ένα μέτρο της ανθεκτικότητας των πετρωμάτων στην διάβρωση και την αποσάθρωση. Οι ασβεστόλιθοι δίδουν κατακόρυφα πρανή σε αντίθεση με τους φυλλίτες-χαλαζίτες που δίνουν πιο ήπιες κλίσεις.

Πρόκειται για μια ανοιχτή κοιλάδα κάτι που οφείλεται σε διαδικασίες αποσάθρωσης σε Νεογενείς σχηματισμούς και στο γεγονός ότι πριν την διαβρωσιγενή διάνοιξη του φαραγγιού των Πρασσών η περιοχή αποτελούσε μια κλειστή λεκάνη που σταδιακά αποστραγγίστηκε. Σε αυτό συνέβαλε η έντονη διάβρωση κατά μήκος ρηγμάτων και διακλάσεων των ασβεστολίθων του φαραγγιού. Η διαδικασία αυτή σχετίζεται με ανοδικές τεκτονικές κινήσεις της Κρήτης που εξανάγκασαν τα νερά να εμβαθύνουν στις παλιές κοίτες και να καταλήξουν στην θάλασσα.

Η λεκάνη είναι σχεδόν κλειστή και συνδέεται με την θάλασσα από τις Πρασσές μέσω της στενής και απότομης χαράδρας (φαράγγι Σφακορύακο), μήκους 5 km και βάθους 300 m περίπου, το οποίο τέμνει παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους. Η τωρινή μορφολογική εικόνα της λεκάνης είναι αποτέλεσμα όχι τόσο τεκτονικών διεργασιών αλλά κυρίως διαβρωτικών, οι οποίες θα μπορούσαν να επιδράσουν στο έργο.

2.1.2 Στρωματογραφία της περιοχής

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν:

i. σε αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που ανήκει στην Ιόνιο ζώνη και είναι γνωστό σαν σειρά Ίδης ή ενότητα Μάνης

ii. σε ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και ανήκει στις ενότητες: α. Τρυπαλίου, β. φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς, γ. σειρά Τριπόλεως, δ. σειρά Πίνδου και ε.της σειράς των οφιολίθων και κρυσταλλοσχιστώδων πετρωμάτων.

Σε γεωλογική χαρτογράφηση 1:50.000 διαφάνηκαν οι εξής σχηματισμοί:

Α. **οφιολιθικό κάλυμμα-κάλυμμα Αστερουσίων**

Στην περιοχή Καρινών, παρατηρείται σύμπλεγμα οφιολίθων και περιδοτιτών, -τοπικά σερπεντινιωμένων-, γάβρρων, δολεριτών καθώς και μικρές εμφανίσεις γνευσίων, αμφιβολλιτών και γρανιτών τα οποία είναι καλύμματα εσωτερικών ζωνών.

Β. **κάλυμμα Βατού**

Νοτιοδυτικά του χωριού ΄΄Πατσός΄΄ αναπτύσσεται σχιστολιθικός σχηματισμός, ελαφρώς μεταμορφωμένος όπου γεωτεκτονικά εντάσσεται στην Πελαγωνική ζώνη, ενώ η ηλικία του τοποθετείται στο κατώτερο Κρητιδικό-Κενομάνιο.

Γ. **Ζώνη Τριπόλεως**

α. *Φλύσχης*: χαρακτηρίζεται από εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών και βρίσκεται σε μεγάλη έκταση στην λεκάνη του ποταμού ΄΄Πλατύς΄΄, νότια της λεκάνης απορροής του φράγματος (περιοχή Αποστόλων, Μέρωνα, Άνω Μέρους).

β. ασβεστόλιθοι του Ανώτερου Τριαδικού-Ανώτερου Κρητιδικού:

είναι παχυστρωματώδεις σκοτεινόχρωμοι ασβεστόλιθοι, σπηλαιώδεις και έντονα καρστικοποιημένοι και κατά θέσεις κερματισμένοι.

γ,Αργιλικοί σχιστόλιθοι του Λαδινίου-Κάρνιου

Υπόκεινται των προηγούμενων ασβεστολίθων. Πρόκειται για σχιστόλιθους τεφρού χρώματος με χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης. Τοπικά στους σχιστόλιθους και ψαμμίτες

παρεμβάλλονται και λεπτές φακοειδείς ενστρώσεις λιθάνθρακα, με πάχος 2-10 cm. Ο σχηματισμός αυτός εντοπίζεται στη κοίτη του φαραγγιού των Κεφαλόβρυσσων .

IV.**φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά του Μέσου Λιθανθρακοφόρου- Ανώτερου Τριαδικού**

Αναφέρεται στην εναλλαγή σερικιτικών, μαρμαρυγιακών και χλωριτικών σχιστολίθων με ημιμεταμορφωμένους ψαμμίτες και χαλαζίτες. Συνήθως στην επαφή των φυλλιτών με τους χαλαζίτες παρεμβάλλονται τοπικά και λεπτές στρώσεις γραφίτη. Παρατηρείται έντονος πτυχωσιγενής και διατμητικός τεκτονισμός, στην επαφή των άκαμπτων χαλαζιτών με τους εύκαμπτους φυλλίτες και τους μαλακούς γραφιτικούς σχιστόλιθους. Η ηλικία του σχηματισμού προσδιορίζεται στο νεώτερο Παλαιοζωικό.

V.**Ιόνιος ζώνη**

Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από ασβεστόλιθους δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους γνωστοί και ως ΄΄Platten Kalk ή πλακώδεις ασβεστόλιθοι''. Είναι έντονα κερματισμένοι και αποκαρστιωμένοι, με τα ανώτερα τμήματα να είναι χρώματος μαύρου και δολομιτιωμένα. Αναπτύσσονται στο ανατολικό άκρο της λεκάνης (περιοχή Κλησιδίου και Μαύρης Κορυφής)

VI. **Μεταλπικά ιζήματα (νεογενή)**

Μετά την αλπική ορογένεση, δημιουργήθηκαν τεκτονικά βυθίσματα (GRABEN), τα οποία πληρώθηκαν με αδροκλαστικά έως λεπτομερή ιζήματα, και οργανογενείς μαργαϊικούς ασβεστόλιθους Μειοκαινικής-Πλειοκαινικής ηλικίας. Στην λεκάνη του φράγματος εντοπίζονται τέτοια ιζήματα τα οποία ανήκουν στα τεκτονικά βυθίσματα του Ρεθύμνου και του Αμαρίου, από τα νεώτερα προς τα παλαιότερα διακρίνονται οι παρακάτω σχηματισμοί:

α)*Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι οργανομειγείς, υφαλώδεις*: χρώματος λευκότεφρο έως λευκοκίτρινο, δημιουργούν επιφάνειες με σχεδόν κατακόρυφα φυσικά πρανή στην

περίμετρο των υψιπέδων. Εντοπίζονται κυρίως στο υψίπεδο της Μονής Βένη (σε υψόμετρο 700 m) καθώς και στην περιοχή των χωριών Σέλι και Πρασσές.

β) Κροκαλοπαγή ασύνδετα έως μετρίως συνδεδεμένα:

Αποτελούνται από κροκάλες και λατύπες συνδεδεμένα με αργιλοαμμώδες υλικό χρώματος ερυθρού. Συχνά στα κροκαλοπαγή παρεμβάλλονται στρώματα ή φακοί ψαμμιτών, αμμούχων μαργών και σε μεμονωμένες θέσεις τα κροκαλοπαγή καλύπτονται από ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους, πάχους μερικών μέτρων.

γ) Άργιλοι ιλυόλιθοι μαργαϊκοί :

Κάτω από τα κροκαλοπαγή και τοπικά αναπτύσσονται άργιλοι και ιλυόλιθοι τεφροί έως τεφροκύανοι οι οποίοι εγκλείουν και λεπτές ενστρώσεις λιγνίτη. Ο σχηματισμός αυτός αναπτύσσεται στην κοιλάδα της ρεματιάς των Κεφαλόβρυσσων.

VII. **Πρόσφατες χαλαρές αποθέσεις (Τερτατογενές)**

Α)Ποτάμιες αποθέσεις

Κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς αποτέθηκαν στην κλειστή λεκάνη του φράγματος, χαλαρές αδροκλαστικές αποθέσεις, το πάχος των οποίων είναι 8,0-14,0m περίπου. Πρόκειται για κροκάλες αναμεμειγμένες με χαλίκια και άμμο που προήλθαν από την διάβρωση του φυλλιτικού – χαλαζιτικού υποβάθρου και των κροκαλοπαγών του Νεογενούς.

Β)Πλευρικά κορήματα

Στην βάση των απότομων πρανών των ασβεστολιθικών καλυμμάτων στα λέπια της νότιας πλευράς του υδροκρίτη και στην απότομη περίμετρο του υψιπέδου της Μονής Βένη, που αποτελείται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, παρατηρούνται

συγκεντρώσεις πλευρικών κορημάτων έχουν μικρό πάχος (0,5-1,0 m) και δεν επιδρούν στο έργο καθώς βρίσκονται υπό ερπυσμό.

2.1.3 Περιοχή εδράσεως φράγματος

Στη θέση του φράγματος διαμορφώνεται χαρακτηριστικό στένωμα με άνοιγμα 120,0 m στην κοίτη (υψόμετρο 162,0 m) και 230,0 m στο υψόμετρο 200,0 m στο οποίο τοποθετείται περίπου και η στέψη του φράγματος.

2.1.3.1 Δεξιό αντέρεισμα

Η κλιτύς του δεξιού αντερείσματος φθάνει σε υψόμετρο 500,0 m περίπου με χαρακτηριστική επιπέδωση στο υψόμετρο 280,0 -300,0 m στο τμήμα του φράγματος η κλίση εδάφους είναι 30° περίπου.

Γεωλογικά το αντέρεισμα αποτελείται από φυλλίτες, σερικιτικούς σχιστόλιθους, ημιμεταμορφωμένους ψαμμίτες και χαλαζίτες. Περί τα 250,0 m. ανάντη του άξονα υπάρχει εγκάρσιο ρέμμα, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση μεταξύ του άξονα του φράγματος και της μισάγγειας αυτής ενός επιμήκους λόφου με διεύθυνση Β-Ν, πλάτους στην βάση 400,0 m. και στη στέψη 300,0m. Ο λόφος αυτός είναι βραχώδης και χαρακτηρίζεται από φυλλίτες και χαλαζίτες με σταθερά πρανή. Η δημιουργία του οφείλεται σε γεωμορφολογικούς παράγοντες και σε ποσοστό 80% είναι καλυμμένος με βλάστηση.

Οι επιφάνειες σχιστότητας, που συμπίπτουν με τις πρωταρχικές επιφάνειες στρώσης, έχουν διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και κλίση 35° προς ΝΑ, δηλαδή προς τα ανάντη του φράγματος. Η κλίση αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊική για την αποφυγή διαφυγών νερού εκτός ταμιευτήρα, και για την ευστάθεια του αντερείσματος δεδομένου ότι οι ασυνέχειες στην θέση αυτή το τέμνουν εγκάρσια με κλίση 35° προς το νότο.

Στο νότιο άκρο του αντερείσματος περί τα 200,0 m ανάντη του άξονα διαμορφώνεται τοπικό σύγκλινο με άξονα ΒΑ-ΝΔ, με τη νοτιοδυτική πλευρά του οποίου να έχει κλίσεις στρώσης αντίθετες προς το φυσικό πρανές και δεν ευνοεί την εκδήλωση ασταθειών. Παρατηρήθηκε η ύπαρξη δυο μικρών ρηγμάτων με απόσταση 15,0 m μεταξύ τους με

διεύθυνση Α-Δ και κλίση 70° προς τον νότο. Λόγω του τοπικού χαρακτήρα των ρηγμάτων αυτών, τα οποία είναι πιθανόν να αποτελούν και απλές διακλάσεις που εκτιμούμε ότι δεν είναι σε θέση να επηρεάσουν το έργο.

Ο λόφος του δεξιού αντερείσματος δεν δημιουργεί κινδύνους διαφυγών προς τα κατάντη καθώς χαρακτηρίζεται από αδιαπέρατους φυλλίτες-χαλαζίτες και η διαδρομή μέχρι την κοιλάδα κατάντη του φράγματος είναι μεγάλη (περίπου 450 m). Στο βάθος της ανώτατης στάθμης ο βράχος είναι στεγανός.

Γενικά, τόσο η αντοχή όσο και η στεγανότητα της βραχομάζας του αντερείσματος αυτού είναι καλή και δεν αναμένονται ιδιαίτερα προβλήματα στο χωμάτινο ή λιθόρριπτο φράγμα. Βέβαια, απαραίτητη κρίθηκε στεγάνωση του υποβάθρου με τσιμεντενέσεις σε βάθος κατάρχήν 15,0-20,0 m και η αφαίρεση της επιφανειακής σαθρής ζώνης πάχους 2,0-3,0 m .

2.1.3.2 Αριστερό αντέρεισμα

Το αριστερό αντέρεισμα αποτελεί το ΝΑ άκρο ενός επίσης στενού και σχετικά χαμηλού λόφου, στην κατάντη πλευρά του οποίου διέρχεται βαθύ ρέμμα, που συμβάλλει στον κυρίως χείμαρρο περί τα 250,0 m. κατάντη του άξονα του φράγματος. Η ύπαρξη αυτού του λόφου οφείλεται επίσης μόνο σε γεωμορφογενετικούς παράγοντες (διάβρωση) και όχι σε τεκτονικούς (ρήγματα).

Το πλάτος του στη βάση είναι περί τα 300,0 m και το ύψος του ανέρχεται σε 230,0 m έως 245,0 m Το αντέρεισμα είναι βραχώδες μέχρι το υψόμετρο των 225,0 m και ομαλότερο στα υψόμετρα 200 m. Η εγκάρσια κλίση του αντερείσματος είναι περίπου 50° και τοπικά σχεδόν κατακόρυφη. Από το υψόμετρο 162,0 m (βάση) και μέχρι τα 225,0 m.επικρατούν φυλλίτες και από τα 225,0 m μέχρι την κορυφή (245,0 m) γωνιώδεις κροκάλες και χαλίκια μετρίως συνδεδεμένα (νεογενές).

Κίνδυνοι διαφυγών φαίνεται να υπάρχουν περί τα 200,0 m στο λόφο του αριστερού αντερείσματος. Ανάντη του άξονα η επαφή των αδιαπέρατων φυλλιτών με τις αποθέσεις του Μειόκαινου βυθίζεται χαμηλότερα από την ανώτατη στάθμη του ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα διαφυγών προς την κατάντη πλευρική κοιλάδα εάν οι

αποθέσεις του Μειόκαινου είναι υδροπερατές (κροκαλοπαγή). Η διαδρομή μέχρι την κατάντη κοιλάδα στο υψόμετρο της ανώτατης στάθμης έχει μήκος μόνο 150,0 m περίπου.

Για την διερεύνηση, του προβλήματος αυτού εκτελέσθηκαν δυο γεωτρήσεις από τις οποίες προέκυψε ότι δεν υπάρχει πρόβλημα καθώς επικρατούν αδιαπέρατες μάργες.

Η κλίση του πρανούς του αντερείσματος ανέρχεται σε 50° περίπου. Οι επιφάνειες σχιστότητας γενικά συμπίπτουν με την αρχική στρώση και κλίνουν με γωνία 40°-45° προς τα δυτικά έως νοτιοδυτικά, δηλαδή είναι αντίρροπες προς το πρανές του αντερείσματος.

Εκτός από τις επιφάνειες σχιστότητας ο βράχος τέμνεται και από δυο συστήματα διακλάσεων, από τα οποία το πρώτο έχει διεύθυνση σχεδόν Β-Ν και κλίνει με γωνία 75^oπρος τα Α και το δεύτερο έχει διεύθυνση Α-Δ και κλίνει με γωνία 75° προς Β.

Το πρώτο σύστημα διακλάσεων, μπορεί να συμβάλλει στην εκδήλωση ασταθειών μόνο εάν δημιουργηθούν πρανή μεγαλύτερα από 70°, ενώ το άλλο σύστημα διακλάσεων και οι επιφάνειες σχιστότητας δεν δημιουργούν προβλήματα γιατί είναι εγκάρσιες ή αντίρροπες προς το πρανές του αντερείσματος.

Το υπόβαθρο του αντερείσματος χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη πετρωμάτων πολύ σκληρών (χαλαζίτες) μέχρι πολύ μαλακών (γραφιτικοί σχιστόλιθοι μυλωνιτιωμένοι) ενώ, νότια του άξονα του φράγματος επικρατούν φυλλίτες με ενστρώσεις γραφιτικών σχιστολίθων, οι οποίοι σε μεγάλο τμήμα είναι καλυμμένοι με υλικά αποσάθρωσης με πάχος από 0,5-1,0 m. που εξαιτίας της ισχυρής κλίσης του φυσικού εδάφους εμφανίζουν φαινόμενα ερπυσμού και αβαθών κατολισθήσεων που όμως δεν επηρεάζουν το έργο.

Οι ζώνες των γραφιτικών σχιστόλιθων σε αυτή την περιοχή, είναι φτωχές σε μηχανικές ιδιότητες, επικρατούν τόσο κάτω από τους χαλαζίτες όσο και πάνω από αυτούς. Η υποκείμενη ζώνη έχει κλίση διαγωνίως αντίρροπη προς το πρανές του αντερείσματος και δεν μπορεί να δώσει κατολισθήσεις.

Οι υπερκείμενες χαλικοαμμώδεις αποθέσεις του Πλειοπλειστόκαινου εμφανίζουν κάποιες επιπόλαιες επιφανειακές ολισθήσεις που δεν επηρεάζουν το φράγμα γιατί βρίσκονται 25 m πάνω από την στέψη του.

Μεταξύ των δυο αντερεισμάτων σχηματίζεται γεωλογικό αντίκλινο με άξονα που έχει διεύθυνση Β-Ν και συμπίπτει σχεδόν με την κοίτη της λεκάνης.

2.1.4 Περιοχή κοίτης

Η κοίτη έχει άνοιγμα 120 m και είναι καλυμμένη από άμμο, ιλύ, κροκάλες και χαλίκια (ποταμοχειμαρρώδεις αποθέσεις) , με πάχος που φτάνει τα 12,5 m σύμφωνα με τις εκετελεσθείσες γεωτρήσεις. Το υπόβαθρο των αποθέσεων χαρακτηρίζεται από φυλλιτικο-χαλαζιτικό σύστημα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις είναι υδροπερατές με στάθμη υπογείων υδάτων 3,6 m από την επιφάνεια του εδάφους. Επομένως ο αργιλικός πυρήνας του εδάφους θα πρέπει να φτάσει μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο, το οποίο είναι σε βάθος 8,0-10,0 m στην δεξιά πλευρά και στο κέντρο 10,0-12,0 m στην αριστερή πλευρά της κοιλάδας.

2.1.5 Τεκτονική

Η στρώση γενικά συμπίπτει με την σχιστότητα των φυλλιτών-χαλαζιτών του υποβάθρου με γενική διεύθυνση Β-Ν και κλίνει συνήθως με γωνία 25°-35° προς τα δυτικά. Παρατηρούνται ωστόσο τοπικά διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ και κλίσεις 30°-40° προς τα ΝΑ.

Παρατηρείται ακόμα έντονη μικροπτύχωση και διάτμηση έως μυλωνιτίωση στους γραφιτικούς σχιστόλιθους και τους εύκαμπτους φυλλίτες στην επαφή τους με σκληρούς χαλαζίτες. Οι χαλαζίτες και οι υγιείς φυλλίτες τέμνονται από δύο συστήματα διακλάσεων, το πρώτο με διεύθυνση Β-Ν και κλίση 66° προς Α και το δεύτερο διεύθυνση Α-Δ και κλίση 74° προς Β. Οι αποθέσεις των νεογενών (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, οργανογενείς μαργαϊκοί σχιστόλιθοι) είναι σχεδόν οριζόντιοι ή κλίνουν με γωνία 10°-15° προς Β.

Οι μεγάλες αλλεπάλληλες επωθήσεις σχετίζονται με τα μεγάλα ρήγματα της περιοχής και με την δημιουργία των τεκτονικών εξάρσεων και τάφρων. Τα επικρατέστερα ρήγματα έχουν διεύθυνση ΔΒΔ/ΑΝΑ και τα δευτερεύοντα ΒΑ-ΝΔ.

2.1.6 Σεισμικότητα

Η Κρήτη προσδιορίζεται στην καμπή του ‘’Ελληνικού τόξου΄΄, όπου νότιως της Κρήτης εκτείνεται η ‘’Ελληνική Τάφρος’’, η οποία χαρακτηρίζεται ως μέτωπο σύγκρουσης της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας.

Αυτό έχει σαν συνέπεια την ισχυρή σεισμική δραστηριότητα κατά κύριο λόγο στην θαλάσσια περιοχή όπου και εντοπίζονται τα σημαντικότερα επίκεντρα σε τεκτονικούς τάφρους στο νότο (μεταξύ της νήσου Γαύδου και της Κρήτης) και στη δύση (δυτικότερα των Χανίων). Σχετικά λιγότερες εστίες εντοπίζονται στο νησί με τις τεκτονικές τάφρους της Μεσσαράς του Ηρακλείου και της Ιεράπετρας να δίνουν τους μεγαλύτερες σεισμικές δονήσεις.

Οι σεισμοί στη βόρεια και στην ανατολική Κρήτη κατηγοριοποιούνται ως ενδιάμεσου βάθους (60 km) ενώ στην δυτική και νότια Κρήτη είναι επιφανειακοί.

Ο μεγαλύτερος σεισμός στην περιοχή του Ρεθύμνου χρονολογείται στις 06/03/1930 και έχει μέγεθος VI της κλίμακας Μερκάλλι. Ο σεισμός αυτός δίνει επιτάχυνση 0,02 g βάσει του εμπειρικού τύπου $ag= 0,26 – 0,1\mathbf{I} +0,01\mathbf{I}^2$, όπου **I** η ένταση του σεισμού (I=6).

Η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική δόνηση της περιοχής του έργου είναι 7,0-8,0 βαθμοί Μερκάλλι (ΤΕΔΥΚ 1982) το μέγιστο μέγεθος σε 7,0 βαθμοί Ρίχτερ και η αναμενόμενη επιτάχυνση 0,10-0,12 sm/sec^2 με πιθανότητα 90% τα επόμενα 50 χρόνια να μην δωθούν μεγαλύτερες επιταχύνσεις.

Ημερομηνία	Μέγεθος σε κλίμακα Ρίχτερ	Ένταση σε κλίμακα Μερκάλλι
8/3/1922	5.5	IV
5/7/1926	5.6	IV
23/1/1929	5.4	VI
17/4/1929	5.2	VI
6/3/1930	5.8	VI
25/7/1954	5.1	IV
16/6/1958	4.5	III
8/5/1962	5,0	V
10/4/1965	4,8	IV
16/1/1966	4,7	IV
25/12/1968	5,2	III
5/9/1974	4,5	V

Πίνακας 1: Σεισμοί στην περιοχή του Ρεθύμνου, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990

2.2 Υδρολιθολογία

Στη μελέτη αυτή περιλαμβάνεται αφενός ο αναμενόμενος όγκος νερού που ταμιεύεται καθώς και η επίπτωση αυτής της δέσμευσης στην υπόγεια υδροφορία από το κατάντι του φράγματος μέχρι την έξοδο του χειμάρρου στη θάλασσα.

Από λιθολογική άποψη οι γεωλογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε:

- υδροπερατοί με πολύ υψηλή περατότητα
- ημιπερατοί με μέτρια περατότητα σχεδόν
- αδιαπέρατοι με χαμηλή έως μηδενική περατότητα

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες εξαιτίας του κερματισμού και της καρστικότητας, το νερό κυκλοφορεί μέσω διακλάσεων, ρωγματώσεων, εγκοίλων κλπ. Σε αυτό συμβάλλει και η ύπαρξη καρστικών πηγών στην περιοχή πηγή Κεφαλόβρυσσα, η Κόκκινη ρίζα στα κατάντη του φράγματος και μια σειρά πηγών στα ανάντη των χωριών Παντάνασσα και Πατσός.

Οι ασβεστόλιθοι της περιοχής αποτελούν ένα ‘’γυμνό κάρστ’’,ή ‘’Ολοκάρστ’’ με μεγάλο αριθμό δολινών (επιφανειακές καρστικές μορφές, βαθιές λακούβες ή τρύπες που σχηματίζονται από την υπονόμευση του εδάφους σε κάποια σημεία).

Το επίπεδο βάσης της καρστικοποίησης διαφέρει από σημείο σε σημείο. Στους ασβεστολιθικούς όγκους -νοτίως του Πατσού και της Παντάνασσας- επίπεδο βάσης αποτελούν οι αδιαπέρατοι σχιστόλιθοι και φυλλίτες πάνω στους οποίους είναι επωθημένοι. Αυτό ισχύει για την ανατολική και την νοτιοδυτική άκρη του ταμιευτήρα. Η κατεύθυνση της υπόγειας ροής καθορίζεται από την κλίση της επαφής των ασβεστολίθων με το υποκείμενο σχιστολιθικό-ασβεστολιθικό σύστημα.

Επίπεδο της βάσης της καρστικοποίησης βόρεια της εισόδου του φαραγγιού των Πρασσών είναι το επίπεδο της θάλασσας. Όμως λόγω των τεκτονικών κινήσεων και της αυξομείωσης της στάθμης κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς και των τεκτονικών κινήσεων οι καρστικοί αγωγοί μπορεί να βρίσκονται 80-100 m χαμηλότερα. Για το λόγο αυτό στους ασβεστόλιθους αναμένεται καρστική υδροφορία σε βάθος μεγαλύτερο της θάλασσας.

Ακόμα οι αλλουβιακές αποθέσεις ανήκουν στους σχηματισμούς μεγάλης περατότητας, πρόκειται για χαλαρές αποθέσεις χαλικών,άμμου και κροκάλων. Το πάχος αυτών των σχηματισμών είναι μικρό και ως εκ τούτου η υδροπερατότητάς του είναι μικρή. Σε αυτές τις αποθέσεις σχηματίζεται προσχωματικός υδροφορέας μεταξύ του φράγματος και της εισόδου του φαραγγιού των Πρασσών.

Στους μέτριας περατότητας μετασχηματισμούς κατατάσσονται οι αποθέσεις του Νεογενούς, που αποτελούνται από κροκαλοπαγή, συνδεδεμένα με άμμο, ιλύ και άργιλο και από χαλαρούς ψαμμίτες.

Ενώ αναμένεται τα κροκαλοπαγή να είναι υδροπερατά σε μεγάλο βαθμό, σε μικρό βάθος παρεμβάλλονται μάργες που ανακόπτουν την διήθηση και η παρουσία της αμμοιλύος είναι μεγαλύτερη από ότι αναμένεται επιφανειακά, γιατί αποπλύνεται επιτρέποντας την επικράτηση των ανδρομερών συστατικών (κροκάλες).

Έτσι η υπόγεια υδροφορία είναι ασθενής παρά την σύσταση των κροκαλοπαγών, κα΄τι το οποίο επιβεβαιώνεται και από την γεώτρηση στην περιοχή των Βολεώνων, που έχει παροχή 10 $μ^3$/ώρα. Όπου τα κροκαλοπαγή επικάθονται σε φυλλίτες παρατηρούνται τοπικά πηγές επαφής, όπως η πηγή Δάφνη κατάντη της διακλάδωσης του δρόμου προς Μύρθιο.

Το σύστημα φυλλιτών- χαλαζιτών είναι σχεδόν αδιαπέρατο, όταν όμως οι χαλαζίτες είναι κερματισμένοι είναι δυνατή η δημιουργία ασθενούς υδροφορίας συνήθως παροδικής. Η κλίση της επαφής των φυλλιτών-χαλαζιτών με τους υπερκείμενους ή τα κροκαλοπαγή καθορίζει την κατεύθυνση των υπόγειων υδάτων.

Σκοπός της υδρολογικής μελέτης είναι ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου δηλαδή η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής και της υπόγειας διήθησης που τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

2.2.1 Μελέτη βροχοπτώσεων

Βροχοπτώσεις είναι κάθε είδους ατμοσφαιρικές και μετεωρικές κατακρημνίσεις οι οποίες εξαρτώνται από ατμοσφαιρικούς και γεωμορφολογικούς παράγοντες της περιοχής. Η μέτρηση γίνεται με βροχόμετρα σε μονάδες mm βαθμονομημένου σωλήνα.

Συμπερασματικά το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 1.210 και 1.427 χιλιοστών, ή μέσο όρο 1.300 χιλιοστά.

Όμως το ελάχιστο ύψος βροχής για τον σταθμό των Βολεώνω αντιστοιχεί σε 845 mm και για ολόκληρη τη λεκάνη με μέσο υψόμετρο 500 m αντιστοιχεί σε 1.210/1.170 = 1,034*845 = 873 mm και το ετήσιο μέγιστο που είναι 1.945 mm σε 2.011 mm.

Επομένως το ελάχιστο μέσο ετήσιο ύψος βροχής για ολόκληρη τη λεκάνη είναι 873 mm, το μέγιστο 2.011 mm και το μέσο ετήσιο ύψος βροχής 1.300 mm.

Μηνιαία κατανομή βροχοπτώσεων												
	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαι	Ιουν	Ιουλ	Αυγ
Ποσοστ%	2,4	8,0	12,2	18,4	23,8	14,8	12,1	5,0	1,8	1,3	0,1	0,1
Ύψος βροχής mm	28,0	94,5	142,8	213,2	279,0	174,0	142,0	58,0	21,0	16,0	2,0	2,0

Πίνακας 2: Μηνιαία κατανομή βροχοπτώσεων, υδρογεωλογική έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990

Το μεγαλύτερο ποσοστό βροχοπτώσεων το 93,5% πέφτει στο εξάμηνο Νοεμβρίου – Απριλίου ενώ την υπόλοιπη περίοδο το ποσοστό είναι εξαιρετικά χαμηλό. Το μέγιστο ύψος βροχής σε ένα 24/ωρο είναι στα 110 mm, και ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών βροχόπτωσης ανέρχεται σε 69,7 ημέρες.

Με δεδομένο το εμβαδόν της λεκάνης του φράγματος 60,25 km^2 και με μέσο ετήσιο ύψος βροχής για όλη τη λεκάνη 1.300 mm προκύπτει ότι ο ετήσιος όγκος βροχής ίσο με $60,25 \cdot 10^6 \cdot 1,3 = 78,32 \cdot 10^6$ m^3.

2.2.2 Απορροή-Εξατμισιδιαπνοή-Κατείσδυση

Η επιφανειακή απορροή μιας λεκάνης εξαρτάται από την ένταση των βροχοπτώσεων, τη μορφολογία της λεκάνης, τη γεωλογία, τη βλάστηση κ.α

Η λεκάνη συγκεντρώνει νερά πλημμυρών και υπόγεια νερά (απορροή βάσης), και συγκεκριμένα εκροές πηγών, τα οποία καταλήγουν στην κοίτη. Στις εκροές πηγών συγκαταλέγονται και η εκροή του ρέματος Κοκκινόριζα, που συνεχίζει μέχρι την είσοδο του φαραγγιού των Πρασσών. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ροή καθ'όλη τη διάρκεια του έτους.

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της απορροής χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες μετρήσεις της παροχής και το υδρολογικό ισοζύγιο.

Ο ετήσιος όγκος απορροής ανέρχεται σε $17,790 \cdot 10^6$ m^3 από τα οποία τα $11,8 \cdot 10^6$ m^3 αποτελούν πλημμυρικές απορροές και τα $5,96 \cdot 10^6$ m^3 απορροές υπόγειων υδάτων.

Το εμβαδό της λεκάνης απορροής ανέρχεται σε 60,250 km^2 και με μέσο ετήσιο ύψος βροχής 1,3 m ο ετήσιος όγκος νερού υπολογίζεται ως $60,250 \cdot 1,3 = 78,32 \cdot 10^6$ m^3 και ο συντελεστής απορροής σε $17,8 \cdot 10^6 / 78,325 \cdot 10^6 = 0,23$. Ο συντελεστής αυτός είναι ετήσιος και εξαρτάται από την εποχή την ένταση των βροχοπτώσεων, τον κορεσμό των υδροφόρων στρωμάτων και από το ρυθμό αναπλήρωσης της εδαφικής υγρασίας. Ο συντελεστής απορροής των καταιγίδων ανάλογα με την εποχή και την ένταση των βροχοπτώσεων κυμαίνεται από 0,30 μέχρι 0,40 με μέσο όρο 0,35. Η εξατμισιδιαπνοή από την ελέυθερη επιφάνεια νερού εκτιμάται στα 1000 χιλιοστά.

Η πραγματική εξατμισιδιαπνοή με βάση τον ημιεμπειρικό τύπο του **TURC**:

$$E = \frac{p}{0.9\frac{p^2}{L^2}}$$

όπου p: το ετήσιο ύψος βροχής (1300 mm)

L: 300+25·T +0.05 ·T^2 και T η θερμοκρασία (18° C)

Η οποία υπολογίζεται στα 812 mm, κάτι που αντιστοιχεί στο 63% των βροχοπτώσεων.

Με την μέθοδο όμως του COUTAGNE η πραγματική εξατμισιδιαπνοή (E) σε m είναι:

E=P-λ·P^2 όπου P: η μέση ετήσια βροχόπτωση σε m (1,3 m), l=1/(0,8+0,14·T) και T η μέση ετήσια θερμοκρασία 18° C ανέρχεται σε 0,793 m ή σε ποσοστό 70%. Οι τιμές και των δύο μεθόδων παρατηρούμε ότι πλησιάζουν αρκετά μεταξύ τους.

Με τους δείκτες Burton-Papaki υπολογίζεται ότι το 50% των βροχοπτώσεων των μηνών Νοεμβρίου, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου και Μαρτίου χάνεται σε εξατμισιδιαπνοή όπως και το 100% των υπόλοιπων μηνών, αποδίδοντας στην εξατμισιδιαπνοή το ποσοστό 59% ή 696,5 mm. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται σε ασβεστολιθικές περιοχές, με απορροή 10% και η κατείσδυση που ανέρχεται σε 35%. Είναι γενικά αποδεκτό ότι ποσοστό νερού ίσο με 70% καταλήγει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξατμισιδιαπνοής.

Η κατείσδυση υπολογίζεται ως 1300mm (βροχή)-800 mm (εξατμισιδιαπνοή)-300 mm (απορροή) = 200 mm που αντιστοιχεί σε όγκο νερού για ολόκληρη τη λεκάνη 60· 10^6·0,2=12· 10^6 m^3 νερό. Στην κατείσδυση περιλαμβάνεται η εδαφική κατακράτηση και η αναπλήρωση της εδαφικής υγρασίας.

2.2.4 Υδρογεωλογία

Έπειτα εξετάστηκε η υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης με τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Ασβεστόλιθοι (νεοπαλαιοζωικοί-μεσοζωικοί)

Χαρακτηρίζονται ως υδροπερατοί στο σύνολό τους λόγω διαρρήξεως και προχωρημένου βαθμού καρστίωσης. Σε περιοχές που δεν έρχονται σε επαφή με την θάλασσα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Σχιστόλιθοι-φυλλίτες-χαλαζίτες (νεοπαλαιοζωικοί-μεσοζωικοί)

Χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι στο σύνολό τους, τοπικά χαρακτηρίζονται ως υδροπερατοί λόγω κερματισμού. Το υδρογεωλογικό τους ενδιαφέρων επικεντρώνεται στη μορφολογία τους κάτω από τους ασβεστολίθους γιατί είναι αυτή που καθορίζει την κίνηση των καρστικών υδάτων των ασβεστολίθων.

Κροκαλοπαγή του Νεογενούς

Θεωρούνται ως μετρίως υδροπερατά τοπικά υδροπερατά ή και στεγανά, ανάλογα με το ποσοστό των αργιλικών και μαργαικών συστατικών. Όπου η συμμετοχή των μαργών είναι μεγαλύτερη ο σχηματισμός χαρακτηρίζεται ως στεγανός.

Προσχώσεις ποταμών

Χαρακτηρίζονται σε μεγάλο βαθμό υδροπερατές λόγω της επικράτησης των αδρομερών υλικών(κροκάλες και χαλίκια). Το πάχος τους είναι μικρό, με αποτέλεσμα τη μικρή υδροαποθηκευτική δυνατότητα.

2.2.5 Κίνηση των υπόγειων υδάτων

Τα διηθούμενα υπόγεια νερά από τους ασβεστολίθους κινούνται πρωταρχικά σύμφωνα με την διεύθυνση του συστήματος των ασυνεχειών, των ρηγμάτων και των καρστικών εγκοίλων και στην συνέχεια από τη μορφολογία της επιφάνειας των

υποκείμενων φυλλιτών και σχιστολίθων. Επομένως τα όρια μιας ασβεστολιθικής υδρογεωλογικής λεκάνης δεν συμπίπτουν με τα υδρολογικά όρια.

Στα νεογενή η κυκλοφορία των υπόγειων υδάτων καθορίζεται από τη μορφολογία του υποβάθρου όταν κάθονται απ'ευθείας σε αυτό ή από την κλίση των αδιαπέρατων μαργαικών παρεμβολών.

2.2.6 Υδρογεωλογικές λεκάνες

Εξαιτίας της έντονης τεκτονικής των εφιππεύσεων και των επωθήσεων στην περιοχή παρατηρούνται μικρές ανεξάρτητες μεταξύ τους υδρογεωλογικές υπολεκάνες. Η κάθεμια από αυτές είναι:

Σύνολο απορροής της λεκάνης του φράγματος

Βάσει των παραπάνω ο συνολικός όγκος απορροής της λεκάνης του φράγματος αποτελείται από την απορροή βάσης και την πλημμυρική απορροή:

Υπολεκάνη	Εμβαδον (km^2)	Πλημ.απορ.($10^6 m^3$)	Απορ.βάσ.($10^6 m^3$)	Σύνολο
Αγκάθι	6/2=3,0	0,45	1,56	2,01
Σωρού	7/3=2,3	0,31	1,08	1,39
Κεφαλλόβρυσσα	17,0	3,70	2,50	6,20
Κλησίδι	7,0	0,91	-----	0,91
Σωρού Χαρκίων	26,0	6,60	-----	6,60
Νεογενή	5,5	1,60	0,65	2,25
Σύνολο	60,8	13,57	5,79	19,36

Πίνακας 3:Σύνολο απορροής λεκάνης φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990

Ο συνολικός αυτός όγκος των $19,36 \cdot 10^6 m^3$ πρόκειται για ένα μέσο υδρολογικό έτος, έχει υπολογιστεί με βάση τη σχέση του μέσου και του ελαχίστου ετησίου ύψους βροχής και τη σχέση του μεγίστου και του μέσου ύψους βροχής από τον βροχομετρικό σταθμό των Βολεώνων. Σε ένα έτος με χαμηλό ποσοστό βροχοπτώσεων ο όγκος θα είναι $19,36 \cdot 10^6 m^3 \cdot 0,72 = 13,93 \cdot 10^6 m^3$ και σε ένα έτος με υψηλό ποσοστό βροχοπτώσεων $19,36 \cdot 10^6 m^3 \cdot 1,6 = 30,98 \cdot 10^6 m^3$. Στις τιμές αυτές προστίθεται και οι εκφορτίσεις των πηγών και κυρίων των πηγών ΄΄Κεφαλόβρυσσα΄΄.

Από την υδρολιθολογική δομή της λεκάνης προκύπτει:

	Εμβαδόν(km^2)	Μ.ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Συντελεστής απορροής	Όγκος απορ.(m^3)
Οφιόλιθοι,σχιστόλιθοι (αδιαπέρατοι)	$6 \cdot 10^6$	1.200	0,35	$2,52 \cdot 10^6$
Νεογενή(ημιπερατά)	$8 \cdot 10^6$	1.200	0,25	$2,40 \cdot 10^6$
Ασβεστόλιθοι(υδρ/τοί)	$2 \cdot 10^6$	1.200	0,10	$0,24 \cdot 10^6$
Αλλούβια	$1 \cdot 10^6$	1.200	0,15	$0,18 \cdot 10^6$
Σύνολο				$5,34 \cdot 10^6$

<u>Πίνακας 4</u>: Συνολική απορροή για τη λεκάνη του φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990

Με άθροισμα πλημμυρικής απορροής και διήθησης στα:

$5,34 \cdot 10^6 + 2,6 \cdot 10^6 = 7,94 \cdot 10^6$ m^3 ή $8 \cdot 10^6$ m^3 κάτι το οποίο συμπίπτει με τον όγκο ($8,2 \cdot 10^6 m^3$) που υπολογίστηκε από το διάγραμμα παροχής.

	Εμβαδόν (km^2)	Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Συντελεστής κατείσδυσης	Όγκος απορροής (m^3)
Οφιόλιθοι,σχιστόλιθοι (αδιαπέρατοι)	$6 \cdot 10^6$	1.200	0,02	$0,14 \cdot 10^6$
Νεογενή(ημιπερατά)	$8 \cdot 10^6$	1.200	0,15	$1,44 \cdot 10^6$
Ασβεστόλιθοι(υδρ/τοί)	$2 \cdot 10^6$	1.200	0,35	$0,84 \cdot 10^6$
Αλλούβια	$1 \cdot 10^6$	1.200	0,15	$0,18 \cdot 10^6$
Σύνολο				$2,6 \cdot 10^6$

Πίνακας 5: Συνολική κατείσδυση για τη λεκάνη του φράγματος, έκθεση ΟΑΔΥΚ 1990

Ο μέσος ετήσιος όγκος απορροής της λεκάνης που αποτελείται από πλημμυρικές απορροές και από εκφορτίσεις υπόγειων υδάτων ανέρχεται σε 18,0-19,0 $\cdot 10^6$ m^3 (συντελεστής 0,24) από τα οποία τα $12,0 \cdot 10^6$ m^3 είναι καθαρά επιφανειακή απορροή και 6,0 $\cdot 10^6$ m^3 απορροή βάσης, δηλαδή υπόγειων νερών που τροφοδοτούν την κοίτη.

2.3 Τύπος φράγματος

Η επιλογή του χωμάτινου ή λιθόρριπτου φράγματος, με τάπητα από αργιλικά ή αδιαπέρατο πυρήνα έγινε εξαιτίας της μεγάλης ανομοιογένειας των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που αποτελούν την περιοχή εδράσεως του φράγματος ,η ύπαρξη έντονα κερματισμένων ζωνών λόγω των μεγάλων καταπονήσεων και η δυνατότητα χρήσης των υλικών των αντερεισμάτων και η διάρρηξη του πετρώματος. Ακόμη ένας παράγοντας που συνέβαλλε στην επιλογή του χωμάτινου φράγματος είναι η μικρή σεισμικότητα της περιοχής. Πιο αναλυτικά για το σώμα του φράγματος, απαιτήθηκαν 1,7 $\cdot 10^6$ m^3 επιχωμάτων (αργιλικός πυρήνας, ζώνες φίλτρων, στραγγιστηρίων, λιθόρριπτου υλικού λατομείου, λιθορροπή, σώματα στήριξης από υγιή υλικά εκσκαφών).

2.3.1 Θεμελίωση φράγματος

Η εκσκαφή για το όρυγμα θεμελίωσης όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων και τις γεωλογικές εκτιμήσεις προσδιορίστηκε σε βάθος 2,0-3,0 m στο δεξιό αντέρεισμα και περί τα 2,0 m στο αριστερό αντέρεισμα.

Στην περιοχή της κοίτης η θεμελίωση του αργιλικού πυρήνα έγινε σε βάθος 8,0-10,0 m στο κέντρο και στην δεξιά πλευρά σε βάθος 10,0 – 12,0 m στην αριστερή πλευρά.

2.3.2 Στεγάνωση υποβάθρου

Ο βράχος εκτός από τις επιφάνειες σχιστότητας τέμνεται και από επιφάνειες διακλάσεων οι οποίες στους χαλαζίτες είναι γενικά ανοιχτές. Στους φυλλίτες οι διακλάσεις είναι γενικά πληρωμένες με αργιλικό υλικό. Στις επιφάνειες επαφής των σκληρών χαλαζιτών με τους φυλλίτες οι τελευταίοι είναι τοπικά έντονα πτυχωμένοι ακόμη και μυλωνιτιωμένοι σε ζώνη πάχους μερικών εκατοστών έως και μερικών μέτρων.

Στο δεξιό αντέρεισμα οι σποραδικές και περιορισμένες σε αριθμό δοκιμές περατότητας που πραγματοποιήθηκαν (LEFRANCE) και (LUGEON) έδωσαν τιμές K που κυμαίνονται μεταξύ 10^{-4} και 10^{-7} cm/sec με συχνότερες τις τιμές 10^{-6} έως 10^{-7} cm/sec.

Στο αριστερό αντέρεισμα οι δοκιμές περατότητας (LEFRANCE και LUGEON) έδωσαν τιμές κ που κυμαίνονται μεταξύ 10^{-5} και 10^{-7}cm/sec. Η τιμή των 10^{-5} χαρακτηρίζει το σχηματισμό ημιπερατό έως μετρίως στεγανό και παρατηρείται κυρίως στα τμήματα που επικρατούν οι χαλαζίτες.

Μεγάλες περατότητες έχει εμφανίσει μόνο η γεώτρηση στο τμήμα 47,0-55,0 m (απώλειες 4-6 1/m/min στις 8 ατμόσφαιρες). Στην πίεση των 4 ατμοσφαιρών που εξασκεί η στήλη του νερού του ταμιευτήρα αντιστοιχούν σε απώλειες 2-3 1/m/min. Πάντως πρόκειται για τοπικό φαινόμενο που δεν χαρακτηρίζει τον σχηματισμό σαν σύνολο.

Και στο αριστερό αντέρεισμα για περεταίρω μείωση των περατοτήτων κρίθηκε απαραίτητη η στεγάνωση του υποβάθρου μέχρι τουλάχιστον το βάθος της στάθμης των υπόγειων υδάτων, δηλαδή μέχρι το βάθος των 30 m περίπου.

Στην κοίτη οι δοκιμές περατότητας στο φυλλιτικό-χαλαζιτικό υπόβαθρο έδωσαν τιμές $\kappa=10^{-4}$ -10^{-6} cm/sec με συχνότερη την τιμή των 10^{-5} cm/sec που χαρακτηρίζει σχηματισμό ημιπερατό έως μετρίως στεγανό.

Η στήλη νερού του ταμιευτήρα στην περιοχή της κοίτης λαμβάνει ύψος 40,0 m και θα εξασκεί πιέσεις μέχρι και 4 ατμόσφαιρες. Αυτό σε συνδυασμό και με την μικρή περατότητα του σχηματισμού καθιστά αναγκαία την στεγάνωση του υποβάθρου σε βάθος 20,0 m περίπου.

Με τις τσιμεντενέσεις θα επιτευχθεί εκτός από την μείωση των περατοτήτων και βελτίωση της βραχομάζας στην οποία εδράζεται το φράγμα.

Κεφάλαιο 3

3.1 Θερμικές καταγραφές

3.1.1 Εισαγωγή

Τα αντικείμενα που έχουν θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (Ο Κ) εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σαν συνέπεια, ότι συναντάμε στο περιβάλλον μας καθημερινά, όπως βλάστηση, πετρώματα και άνθρωποι εκπέμπουν θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία στο 3.0-14 μm τμήμα του φάσματος. Τα διάφορα μέρη ενός τοπίου έχουν προβλέψιμα θερμικά χαρακτηριστικά που βασίζονται στην επιλεκτική απορρόφηση ηλιακής μικρο-κυματικής ακτινοβολίας και στην εκπομπή θερμικής υπέρυθρης ενέργειας. Τα μάτια μας, ωστόσο δεν μπορούν να ανιχνεύσουν λεπτές θερμικές διαφορές στην θερμική υπέρυθρη ενέργεια που εκπέμπεται από τα αντικείμενα επειδή είναι ευαίσθητα κυρίως, σε μήκη κύματος ορατού φωτός (0.4-0.7 μm). Δεν είναι ευαίσθητα στο ανακλαστικό υπέρυθρο ή στη θερμική υπέρυθρη ενέργεια (3.0-14μm).

Ευτυχώς, με την πρόοδο της τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί ανιχνευτές που είναι ευαίσθητοι στην θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία. Οι θερμικοί αυτοί υπέρυθροι ανιχνευτές επιτρέπουν στους ανθρώπους να αισθάνονται ένα προηγούμενο αόρατο κόσμο πληροφοριών, κατά την παρατήρηση ενός τοπίου.

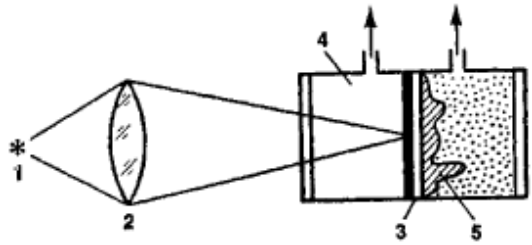
Τα θερμικά υπέρυθρα τηλεπισκοπικά συστήματα καταγράφουν θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει: 1) το τύπο του υλικού βασισμένο στα θερμικά χαρακτηριστικά εκπομπής και/ή 2) αν έχουν σημειωθεί αλλαγές στα θερμικά χαρακτηριστικά αυτών με την πάροδο του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο είναι πιθανό να εντοπιστεί η επιφάνεια φυσικών εκδηλώσεων ορισμένων ασθενειών στους ανθρώπους ή στα φυτά, θερμική μόλυνση σε υδατικούς όγκους, ή απώλεια θερμότητας στα κτήρια λόγω ελαττωματικής μόνωσης.

Η εναέρια θερμική υπέρυθρη εικόνα δε ήταν ευρέως διαθέσιμη στο κοινό λόγο του σχετικού υψηλού κόστους του θερμικού ανιχνευτή, 2) το κόστος της κινητοποίησης ενός

αεροσκάφους και 3)την δυσκολία της συνόρθωσης της εικόνας. Η θερμική υπέρυθρη τηλεπισκόπηση έγινε ευρέως γνωστή από εφαρμογές κοντινών αποστάσεων όπως: επαγγελματικές μελέτες για την απώλεια θερμότητας λόγω μόνωσης σε κατοικίες, τον εντοπισμό ανθρώπων σε φωτιές ή στο σκοτάδι σε ιατρικά θέματα (μερικές φορές αποκαλείται και θερμογραφία) και από τις μη καταστροφικές αξιολογήσεις ηλεκτρονικών συστημάτων.

3.1.2 Ιστορία της θερμικής υπέρυθρης τηλεπισκόπησης

Ο **Frederick William Hersel (**1738-1822) ίσως ο πιο γνωστός αστρονόμος του 18ου αιώνα ανακάλυψε το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Με ένα πρίσμα δημιούργησε ένα φάσμα χρωμάτων και μέτρησε διαφορετικά τμήματα του φάσματος με ένα θερμόμετρο προκειμένου να προσδιορίσει αν κάποια χρώματα είναι θερμότερα από κάποια άλλα. Καθώς μετακινούσε το θερμόμετρο προς το κόκκινο τμήμα του φάσματος η θερμοκρασία αυξάνονταν αντίθετα με ότι περίμενε και όταν πέρασε το τέλος του κόκκινου τμήματος. Αυτή την θερμοκρασία την ονόμασε υπέρυθρη γιατί είναι πέρα από την ερυθρή. Τα θερμικά συστήματα απεικόνισης βασίζονται σε αυτά τα φαινόμενα που ανακαλύφθηκαν περίπου στα 200 χρόνια πρίν. Αργότερα, ο John Herschel (1840) παρήγαγε την πρώτη υπέρυθρη εικόνα χρησιμοποιώντας μια μέθοδο την οποία ονόμασε εξατμισιογραφία.



<u>Εικόνα1</u>: Διάγραμμα της διαδικασίας παρακολούθησης μιας εικόνας στην εξατμισιογραφία. (1)το αντικείμενο προς παρατήρηση (2)φακοί συνήθως υπέρυθροι (3)θάλαμος κενού (4)έξοδος υγρού (Faerman,1963)

Με την εξάτμιση αλκοόλ από επιχρισμένες με άνθρακα επιφάνειες, μια ορατή εικόνα παράχθηκε. Αυτή ήταν η πρώτη θερμογραφία. Πέρασαν 89 χρόνια μέχρι ο **Czerny** να δώσει μια βελτίωση στην δημιουργία εικόνας.

Το 1879 ο **S.P.Langley** ξεκίνησε ένα ερευνητικό πρόγραμμα για να βρει έναν ανώτερο ανιχνευτή ακτινοβολίας. Ένα χρόνο αργότερα, εφυήρε το βολόμετρο που μπορούσε να μετρήσει διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του 1/10000 ^{o}C. Τώρα υπάρχουν πολύ γρήγοροι αισθητήρες που αποτελούνται από υδράργυρο ενισχυμένο με γερμάνιο (Ge:Hg) ίνδιο, αντιμονίτη (In:Sd) και άλλες ουσίες που είναι πολύ ευαίσθητες στην υπέρυθρη ακτινοβολία.

Το 1946, ο στρατός ανέπτυξε τον πρώτο υπέρυθρο γραμμικό σαρωτή. Βάζοντας πολλές γραμμές μαζί δημιουργήθηκε μια δισδιάστατη εικόνα. Η θερμογραφία μπορούσε να παραχθεί σε μια ώρα. Προσθέτοντας, τον σαρωτή (1954) το σύστημα μπορούσε να δημιουργήσει δισδιάστατη εικόνα. Ακόμα και με αυτή την βελτίωση, η παραγωγή εικόνας γινότανε σε 45 λεπτά. Το 1960 ο χρόνος για την παραγωγή εικόνας μειώθηκε στα 5 λεπτά.

Το 1966, η πρώτη πραγματικού χρόνου εμπορική απεικόνιση, που παρήγαγε 20 εικόνες το δευτερόλεπτο, είχε εισαχθεί. Η μανιώδης εξέλιξη της τεχνολογίας υπό την πίεση εφαρμογών ανάπτυξης, συνέβη τις δεκαετία του 70, 80 και 90. Ίσως η σπουδαία εξέλιξη στα συστήματα ανάπτυξης να συνέβη την δεκαετία του 90: Εισαγωγή σε υψηλής ανάλυσης συστοιχίες εστιακού επιπέδου (FPAs) και ψυχρές. Τα συστήματα απεικόνισης, μπορούν τώρα να παράγουν εκατοντάδες εικόνες ανα δευτερόλεπτο και υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικά παρέχουν σε πραγματικό χρόνο επεξεργασία εικόνας. Τα συστήματα απεικόνισης, του μέλλοντος είναι περιορισμένα μόνο από την ανθρώπινη φαντασία.

Η θερμική υπέρυθρη φωτογράφηση χρησιμοποιήθηκε με στόχο τις εγκαταστάσεις του εχθρού στον πόλεμο του κόλπου το 1991 και στον πόλεμο του Ιράκ το 2006. Επιπλέον οι κυβερνητικές υπηρεσίες χρησιμοποιούν συχνά θερμικούς υπέρυθρους ανιχνευτές χειρός (forward-looking infrared sensors FLIR) τοποθετημένους σε αεροσκάφη για τον εντοπισμό αγνοουμένων και της εγκληματικής δραστηριότητας.

Year	Event
1800	Discovery of the existence of thermal radiation in the invisible beyond the red by W. Herschel
1822	Discovery of the thermoelectric effects using an antimony–copper pair by T. J. Seebeck
1830	Thermal element for thermal radiation measurement by L. Nobili
1833	Thermopile consisting of 10 in-line Sb-Bi thermal pairs by L. Nobili and M. Melloni
1834	Discovery of the Peltier effect on a current-fed pair of two different conductors by J. C. Peltier
1835	Formulation of the hypothesis that light and electromagnetic radiation are of the same nature by A. M. Ampère
1839	Solar absorption spectrum of the atmosphere and the role of water vapour by M. Melloni
1840	Discovery of the three atmospheric windows by J. Herschel (son of W. Herschel)
1857	Harmonisation of the three thermoelectric effects (Seebeck, Peltier, Thomson) by W. Thomson (Lord Kelvin)
1859	Relationship between absorption and emission by G. Kirchhoff
1864	Theory of electromagnetic radiation by J. C. Maxwell
1879	Empirical relationship between radiation intensity and temperature of a blackbody by J. Stefan
1880	Study of absorption characteristics of the atmosphere through a Pt Bolometer resistance by S. P. Langley
1883	Study of transmission characteristics of IR-transparent materials by M. Melloni
1884	Thermodynamic derivation of the Stefan law by L. Boltzmann
1894, 1900	Derivation of the wavelength relation of blackbody radiation by J. W. Rayeigh and W. Wien
1903	Temperature measurements of stars and planets using IR radiometry and spectrometry by W. W. Coblentz
1914	Application of bolometers for the remote exploration of people and aircrafts
1930	IR direction finders based on PbS quantum detectors in the wavelength range 1.5–3.0 μm for military applications (Gudden, Görlich and Kutscher), increased range in World War II to 30 km for ships and 7 km for tanks (3–5 μm)
1934	First IR image converter
1939	Development of the first IR display unit in the US (Sniperscope, Snooperscope)
1947	Pneumatically acting, high-detectivity radiation detector by M.J.E. Golay
1954	First imaging cameras based on thermopiles (exposure time of 20 min per image) and on bolometers (4 min)
1955	Mass production start of IR seeker heads for IR guided rockets in the US (PbS and PbTe detectors, later Sb detectors for Sidewinder rockets)
1965	Mass production start of IR cameras for civil applications in Sweden (single-element sensors with optomechanical scanner: AGA Thermografiesystem 660)
1968	Production start of IR sensor arrays (monolithic Si-arrays: R.A. Soref 1968; IR-CCD: 1970; Schottky diode arrays: F.D. Shepherd and A.C. Yang 1973; IR-CMOS: 1980; SPRITE: T. Eliott 1981)
1995	Production start of IR cameras with uncooled FPAs (Focal Plane Arrays; microbolometer-based and pyroelectric)

Εικόνα 2: ιστορική εξέλιξη της υπέρυθρης τεχνολογίας (H.Budzier and G.Gerlach 20

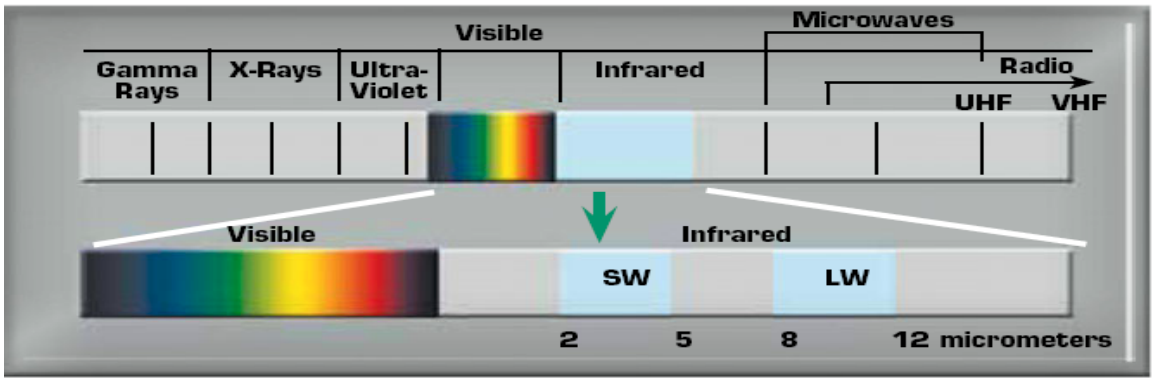
3.1.3 Θερμικό φάσμα

Ο ήλιος είναι μια άριστη πηγή ενέργειας και ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από την γη και επανεκπέμπεται. Στη γη ο ήλιος συνεχώς αναπληρώνει την θερμότητα. Χωρίς τον ήλιο, η επιφάνεια της γης θα γινόταν ψυχρή και στην θερμοκρασία του διαστήματος- η οποία είναι κοντά στο απόλυτο μηδέν-. Η ένταση και η διάρκεια φωτισμού για μια συγκεκριμένη θέση μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος, την τοπογραφία της περιοχής, την εποχή και την ώρα της ημέρας. Ο βαθμός της ψύξης και της θέρμανσης εξαρτάται από τις μονωτικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας και της νεφοκάλυψης. Η μόνωση αυτών των δύο έχει σαν αποτέλεσμα να ελαχιστοποιεί τις επιφανειακές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και επιτρέπει την ύπαρξη ζωής.

Η θερμότητα δημιουργείται όταν η εσωτερική ενέργεια ενός σώματος απελευθερώνεται. Η ανακλαστικότητα και η εκπομπή ενός εδαφικού στόχου, ποικίλλει σημαντικά μεταξύ διαφορετικών υλικών και σε συνάρτηση με το χρόνο. Εξαιτίας αυτών των διαφορών είναι δυνατόν να προσδιοριστεί αυτή η ταυτότητα των επίγειων αντικειμένων και η ιδιότητα αυτή εφαρμόζεται στην ερμηνεία των θερμικών εικόνων. (Μπαντέκας, 1978)

Το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από εκείνα του ορατού φωτός μετρούμενα από ορατό κόκκινο φως σε 0,74 μm μέχρι 1000 μm, στα όρια με την περιοχή των μικροκυμάτων. Τα όρια ανάμεσα στο ορατό και στο υπέρυθρο δεν είναι επακριβώς καθορισμένα.

Το φώς του ήλιου στο ζενίθ παρέχει μια ακτινοβολία λίγο περισσότερο από 1 kwatt ανα τετραγωνικό μέτρο στο επίπεδο της θάλασσας. Από αυτή την ενέργεια 527 watt αντιστοιχούν στην υπέρυθρη ακτινοβολία, 445 watt στο ορατό φώς και 32 watt στην υπεριώδη ακτινοβολία.



Εικόνα 3: το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Εγγύς υπέρυθρο: η ακτινοβολία που εκτείνεται από 0,76 μm μέχρι 3,0 μm ανήκει στην ζώνη του εγγύς υπέρυθρου (ή ανακλώμενο υπέρυθρο) και δεν εφαρμόζεται σε θερμικές καταγραφές. Το τμήμα του μήκους κύματος από 3-14 μm ονομάζεται θερμικό υπέρυθρο και διαιρείται στο μέσο και άπω υπέρυθρο.

Το μέσο υπέρυθρο (3-5 μm) εφαρμόζεται στον εντοπισμό υψηλών θερμοκρασιακών στόχων όπως πυρκαγιών, λάβας και θερμών πηγών. Ονομάζεται και περιοχή δακτυλικών αποτυπωμάτων αφού το υπέρυθρο φάσμα μιας ένωσης είναι πολύ συγκεκριμένο για αυτή την ένωση. **Το άπω υπέρυθρο** (8-14 μm) χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση στόχων που παρουσιάζουν μέτριες θερμοκρασίες των 300 K (27° C) περίπου. Το κάτω μέρος αυτού του φάσματος μπορεί να θεωρηθεί μικροκύματα.

Σε αυτό το εύρος της ακτινοβολίας είναι έντονη η απορρόφηση από τους υδρατμούς το διοξείδιο του άνθρακα και το όζον, ιδιαίτερα στη ζώνη 10,5-12,5 μm. Ωστόσο υπάρχουν μερικές σειρές μήκους κύματος δίαυλοι εντός των αδιαφανών περιοχών που επιτρέπουν την μερική μετάδοση και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αστρονομία. Οι εφαρμογές της τηλεπισκόπησης στο εγγύς και στο ορατό στηρίζονται στην διαφοροποίηση των ιδιοτήτων των αντικειμένων λόγω της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα στο μέσο και στο άπω υπέρυθρο ανιχνεύει διαφορές στις ιδιότητες των αντικειμένων αφού αυτά απορροφήσουν και επανεκπέμψουν σε μεγαλύτερο μήκος κύματος αυτό του άπω και του υπέρυθρου (Μερτίκας, 1999). Στο εγγύς υπέρυθρο διενεργούνται εργασίες που είναι παρόμοιες με εκείνες για το ορατό.

3.1.3.1 Θερμικοί υπέρυθροι ατμοσφαιρικοί δίαυλοι

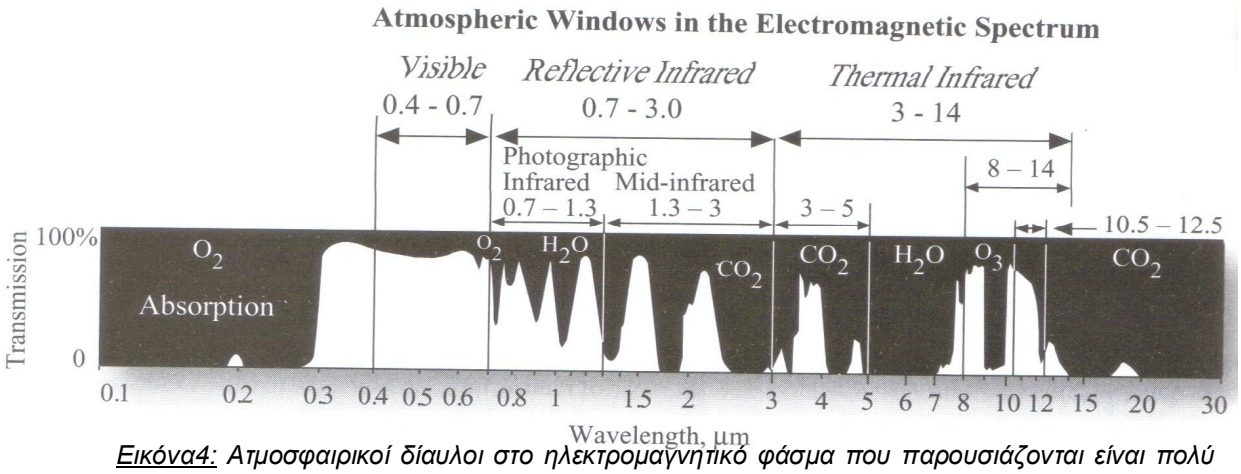
Ο μόνος λόγος που χρησιμοποιούμε τηλεπισκοπικά όργανα για να ανιχνεύσουμε υπέρυθρη ενέργεια σε αυτά τα τμήματα είναι γιατί η ατμόσφαιρα επιτρέπει ένα τμήμα από αυτή την ενέργεια να μεταφερθεί από το έδαφος στους ανιχνευτές. Ονομάζουμε τα τμήματα τα οποία περνάει η ενέργεια **ατμοσφαιρικά παράθυρα ή ατμοσφαιρικούς διαύλους.**

Οι μαύρες περιοχές στην (εικόνα 4) δηλώνουν τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που η ατμόσφαιρα απορροφά το μεγαλύτερο μέγεθος της παρούσας υπέρυθρης ενέργειας. Αυτά τα τμήματα ονομάζονται ζώνες απορρόφησης. Οι υδρατμοί (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), και το όζον (O_3) είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης. Η ατμόσφαιρα καθίσταται αδιαφανής και είναι σχεδόν αδύνατο να εκτελεσθεί η τηλεπισκόπηση περιβάλλοντος σε αυτά τα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Για παράδειγμα οι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί απορροφούν την περισσότερη ενέργεια που βρίσκεται στο έδαφος στο τμήμα 5-7 μm, καθιστώντας το ανώφελο για την υπέρυθρη τηλεπισκόπηση.

Στο ορατό ή κοντά στο ορατό τμήμα του φάσματος η διάχυση είναι η κύρια αιτία μείωσης της ενέργειας. Στο **άπω υπέρυθρο** μόνο η απορρόφηση περιορίζει τις ατμοσφαιρικές διόδους. Οι φασματικές δίοδοι της ατμόσφαιρας που χρησιμοποιούνται από τους θερμικούς ανιχνευτές είναι τα τμήματα 3-5 μm και 8-14 μm, ενώ για τους θερμικούς ανιχνευτές των δορυφόρων από 3-4 μm και μεταξύ 10,5-12,5 μm. Επιπλέον το τμήμα από 3-4 μm επηρεάζεται κατά την διάρκεια της ημέρας από την ανάκλαση της γήινης επιφάνειας και για αυτό χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μετρήσεις κυρίως την νύχτα. Διακυμάνσεις στην εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια παρέχουν πληροφορίες που αφορούν στις επιφανειακές θερμοκρασίες, στις θερμικές ιδιότητες εδαφών και πετρωμάτων, στην βλάστηση και στις ανθρώπινες κατασκευές.

Τα τηλεπισκοπικά μέσα μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να είναι ευαίσθητα να παρουσιάζουν την υπέρυθρη ενέργεια μέσα στα ατμοσφαιρικά παράθυρα. Για παράδειγμα

τα γαλακτώματα μπορούν να είναι ευαίσθητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία στον δίαυλο από 0.7-1.3 μm. Οι ηλεκτρονικοί ανιχνευτές μπορούν να είναι ευαίσθητοι στα φωτόνια της θερμικής υπέρυθρης ακτινοβολίας που εξέρχονται από το έδαφος σε δυο κύριους θερμικούς υπέρυθρους διαύλους: 3-5 μm και 8-14μm. Ωστόσο το στρώμα του όζοντος απορροφά πολύ από την θερμική ενέργεια που εξέρχεται από το έδαφος στις ζώνες απορρόφησης περίπου 9.2 - 10.2 μm.



<u>Εικόνα4:</u> Ατμοσφαιρικοί δίαυλοι στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που παρουσιάζονται είναι πολύ σημαντικοί για την θερμική υπέρυθρη ανίχνευση.(Jensen,2007)

3.2 Νόμοι της θερμικής ακτινοβολίας

Ένα μέλαν σώμα είναι το θεωρητικό σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του και ακτινοβολεί ενέργεια στο μέγιστο δυνατό ποσοστό σε κάθε μήκος κύματος για οποιαδήποτε θερμοκρασία. Κανένα σώμα στη γη δεν είναι πραγματικά μελανό παρόλα αυτά θεωρούμε τον ήλιο προσεγγιστικά μελανό σώμα στα 6000 K και την γη στα 300K.

1. **Νόμος μετατοπίσεων Wien**

Η σχέση μεταξύ της πραγματικής θερμοκρασίας ενός μελανού σώματος (T) σε βαθμούς K και της κορυφής της φασματικής απόκρισης ή το μέγιστο μήκος κύματος (λ_{max}) περιγράφεται από το νόμο μετατοπίσεων του Wien.

$$\lambda max= \frac{\kappa}{T} \qquad (2.3)$$

Όπου ***κ*** είναι μια σταθερά που ισούται με 2898μm K. Μπορούμε να καθορίσουμε το μήκος κύματος (λ_{max}) από οποιοδήποτε αντικείμενο υποκαθιστώντας την θερμοκρασία του στην εξίσωση (2.3). Η γνώση του μέγιστου μήκους κύματος είναι σημαντική στην θερμική τηλεπισκόπηση γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με το τμήμα του θερμικού υπέρυθρου φάσματος στο οποίο μπορούμε να αισθανθούμε το αντικείμενο. Για παράδειγμα, αν ενδιαφερόμαστε για το έδαφος ,το νερό ή τις ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες στην επιφάνεια της γης (300 K) με κυρίαρχο μήκος κύματος 9,67 μm τότε ένας θερμικός υπέρυθρος ανιχνευτής στο τμήμα 8-14 μm θα ήταν ίσως ο πιο κατάλληλος.

2. **Νόμος του Stefan-Boltzmann**

Ο νόμος Stefan –Boltzmann περιγράφει το συνολικό ποσοστό των εκπομπών ανά μονάδα επιφάνειας.

$$M=\sigma T^4 (w/m^2) \qquad (2.4)$$

Όπου ***T*** είναι η απόλυτη θερμοκρασία (μετρούμενη σε Kelvin) και **σ** η σταθερά Stefan-Boltzmann 5.67x 10^{-8} $W/(m^2 \cdot K^4)$. Ο νόμος αυτός περιγράφει την αύξηση της ολικής ακτινοβολίας με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα ένα αντικείμενο με επιφάνεια 2 m^2 στους 98.6^o F θα ακτινοβολήσει ενέργεια 2.8kW αν η περιβαλλοντική θερμοκρασία είναι (0K).

3.**Νόμος του Planck**

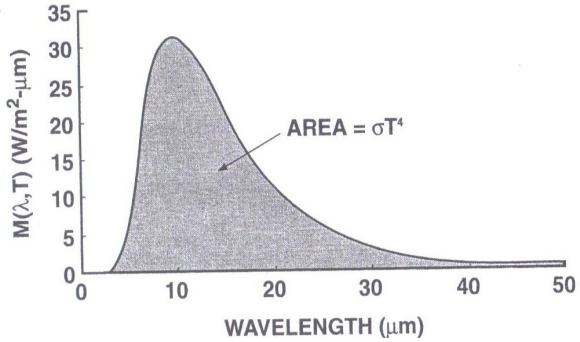
Οι περισσότεροι ανιχνευτές αισθάνονται ακτινοβολία από ένα συγκεκριμένο τμήμα μήκους κύματος. Η συνολική πυκνότητα ισχύος σε ένα διάστημα από λ_1 σε λ_2 προκύπτει από το εμβαδόν της περιοχής που οριοθετεί η καμπύλη. Μαθηματικά εκφράζεται ως:

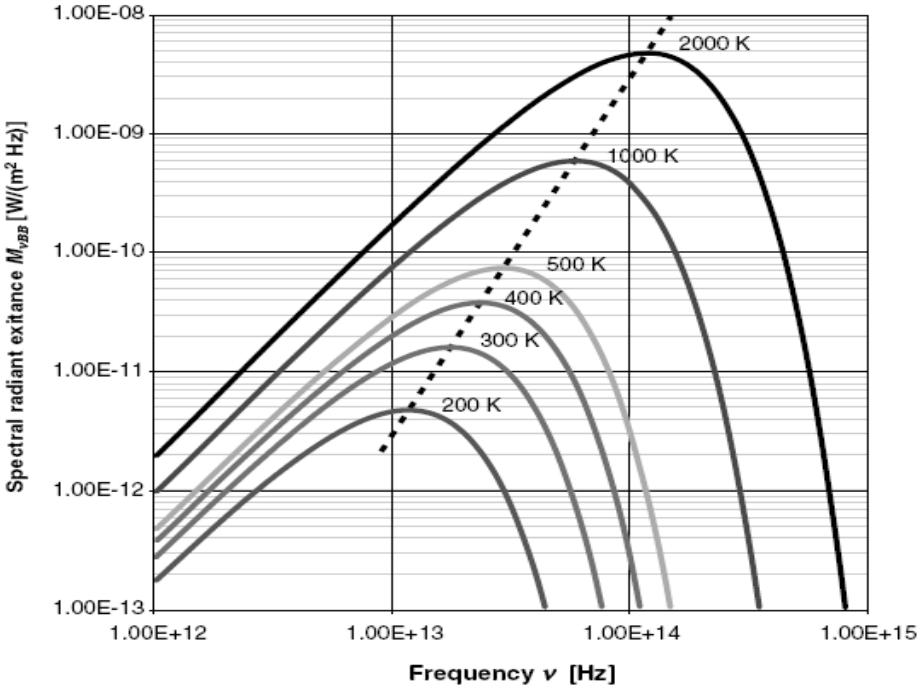
$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \qquad (2.5)$$

Όπου $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Για πολλές εφαρμογές, η θερμοκρασία στόχου είναι κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της ακτινοβολίας του μέλανου σώματος, είναι ότι οι καμπύλες δεν διασταυρώνονται. Αν παρακολουθήσουμε την ένταση του φωτός, σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος τότε μπορούμε να καθορίσουμε μοναδικά την θερμοκρασία. Αυτή η ιδιότητα χρησιμοποιείται στα πυρόμετρα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η τιμή της εκπομπής αυξάνεται ραγδαία. Ο στόχος αρχίζει να λάμπει σε μια θερμοκρασία των 600 K. Αυτό ονομάζεται λάμψη πυρακτώσεως. Με την περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, παρουσιάζεται περισσότερη ακτινοβολία στο ορατό.

<u>Εικόνα 5</u>: το εμβαδόν της περιοχής είναι ίσο με το νόμο του Stefan-Boltzmann. Η θερμοκρασία του στόχου είναι στα 300K. (Holst,2000)





Εικόνα 6: Νόμος ακτινοβολίας του Planck με συχνότητα ν. Παράμετρος θερμοκρασία. Οι διακεκομένες γραμμές είναι ο νόμος μετατοπίσεων του Wiens (Budzier ,Gerlach ,2011)

3.2.1 Συντελεστής Εκπομπής

Ο κόσμος αποτελείται από επιλεκτικά ακτινοβολούμενα σώματα που εκπέμπουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ενέργειας που θα εκπεμπόταν από ένα μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Εκπομπή είναι ο λόγος μεταξύ της πραγματικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα πραγματικό σώμα (Mr) προς την ακτινοβολία ενός μελανού σώματος στην ίδια θερμοδυναμική (κινητική) θερμοκρασία(Mb).

$$\varepsilon=\frac{Mr}{Mb} \qquad (2.6)$$

Όλα τα πραγματικά σώματα έχουν συντελεστή εκπομπής από 0 μέχρι <=1. Ένα φαιό σώμα έχει συντελεστή εκπομπής που είναι μικρότερος του 1 σε όλα τα μήκη κύματος. Τα μελανά σώματα έχουν συντελεστή εκπομπής ίσο με 1. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε

τον συντελεστή εκπομπής για το λόγο ότι δυο διαφορετικά σώματα που βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο στο έδαφος μπορεί να έχουν την ίδια κινητική θερμοκρασία αλλά διαφορετική φαινομενική όταν απεικονιστούν από θερμικό ραδιόμετρο επειδή οι συντελεστές εκπομπής είναι διαφορετικοί. Η κινητική θερμοκρασία είναι γνωστή και ως αληθής θερμοκρασία, αντιπροσωπεύει την θερμική ενέργεια των μορίων του υλικού, ενώ η φαινόμενη θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία που παρατηρείται μακρόθεν από συσκευές τηλεπισκόπησης.

Ο συντελεστής εκπομπής επηρεάζεται από ένα αριθμό παραγόντων όπως:

Χρώμα: Σκουρόχρωμα αντικείμενα έχουν μεγαλύτερη απορρόφηση και εκπομπή από ανοιχτόχρωμα αντικείμενα.

Τραχύτητα επιφάνειας: Όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου σε σχέση με το προσπίπτων μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του αντικειμένου και η δυνατότητα απορρόφησης και επανεκπομπής της ακτινοβολίας.

Περιεκτικότητα σε υγρασία : Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός αντικειμένου, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητά του να απορροφά ενέργεια. Τα υγρά σωματίδια του εδάφους έχουν υψηλό συντελεστή εκπομπής παρόμοιο του νερού.

Το μήκος κύματος: Ενώ ο συντελεστής εκπομπής ενός αντικειμένου συχνά θεωρείται ότι είναι σταθερός στο διάστημα 8-14 μm, μπορεί να είναι διαφορετικός στο 3-5μm.

Η οπτική γωνία: ο συντελεστής εκπομπής ποικίλλει ανάλογα με το αισθητήρα γωνίας θέασης.

3.2.3 Θερμικές ιδιότητες του εδάφους

Το νερό, το έδαφος, η βλάστηση, η ατμόσφαιρα, ο ανθρώπινος ιστός έχουν την δυνατότητα να μεταδώσουν θερμότητα διαμέσου αυτών (θερμική αγωγιμότητα) σε μια άλλη επιφάνεια και να αποθηκεύουν θερμότητα (θερμοχωρητικότητα). Κάποια υλικά

αντιδρούν στις θερμοκρασιακές αλλαγές πιο γρήγορα ή πιο αργά από τα άλλα (θερμική αδράνεια).

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

Οι ιδιότητες αυτές περιγράφονται από:

- Συντελεστής απορρόφησης α
- Συντελεστής ανάκλασης ρ
- Διαπερατότητα τ
- Συντελεστής εκπομπής ε(λ)
- Θερμοχωρητικότητα C
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας K
- Θερμική αδράνεια P

1.Ο συντελεστής απορρόφησης α: ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που απορροφάται προς την ισχύ που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός σώματος. $\alpha = E_A/E_I$ όπου E_I είναι η προσπίπτουσα ισχύς σε W/cm^2 και E_A η απορροφούμενη από το σώμα ισχύς.

2.Ο συντελεστής ανάκλασης ρ: μιας επιφάνειας, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που ανακλάται προς την ισχύ που προσπίπτει. $\rho = E_R/E_i$.

3.Η διαπερατότητα: είναι το ποσοστό της ισχύος της ακτινοβολίας που διαδίδεται διαμέσου του υλικού.[1]

Οι συντελεστές α και ρ εξαρτώνται από το μήκος κύματος και την επιφάνεια του υλικού .Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, για κάθε μήκος κύματος ισχύει :

$$\alpha(\lambda)+\rho(\lambda)+\tau(\lambda)=1 \qquad (2.7)$$

4.Η **θερμοχωρητικότητα** (C) (thermal capacity)

Είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια. Ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός γραμμαρίου του υλικού κατά 1° C (cal /g^{-1} ^{o}C^{-1}). Το νερό έχει την υψηλότερη θερμοχωρητικότητα από οποιαδήποτε κοινή ουσία (1.00). Κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας η θερμοκρασιακή διακύμανση της λίμνης είναι πολύ μικρή. Αντίθετα τα πετρώματα δεν αποθηκεύουν την θερμότητα το ίδιο με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν σημαντικά θερμοκρασιακές διαφορές τη μέρα με τη νύχτα.

Τα υλικά διαφέρουν στην ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να παράξουν ανύψωση της θερμοκρασίας.

$$\text{Θερμοχωρητικότητα}=\frac{Q}{(T_2-T_1)} \qquad (2.8)$$

Όπου Q είναι η ποσότητα της θερμότητας που παρέχεται και T_2-T_1 είναι η αύξηση της θερμοκρασίας. Η ειδική θερμοχωρητικότητα ορίζεται ως η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας.

$$C=\frac{Q}{m(T_2-T_1)} \qquad (2.9)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα είναι το ποσό της θερμότητας που θα πρέπει να δωθεί σε μια μονάδα μάζας του υλικού ώστε να αυξήσει την θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό. Η τιμή c της ειδικής θερμοχωρητικότητας είναι μοναδική για κάθε υλικό. Υψηλής θερμοχωρητικότητας αντικείμενα, απαιτούν περισσότερη θερμότητα από ότι χαμηλής ειδικής θερμοχωρητικότητας.

Τα τρία κοινά μέτρα της θερμότητας είναι το gram-calorie (cal ή g-cal) , kilogramcalorie (kcal ή kg-cal) και η βρετανική θερμική μονάδα (BTU). Το κg-cal είναι η ποσότητα της θερμότητας που πρέπει να δώσουμε σε ένα κιλό νερό για να ανεβάσουμε την θερμοκρασία ένα βαθμό κελσίου.

5.Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (K)

Ορίζεται ως το μέτρο του ρυθμού με την οποία το υλικό μπορεί να μεταδώσει θερμική ενέργεια δι' αγωγής. Μετριέται ως τον αριθμό των θερμίδων που θα διέλθουν από $1cm^3$ υλικού σε 1 sec όταν οι αντίθετες πλευρές του κύβου έχουν θερμοκρασιακή διαφορά 1 ^oC. Η αγωγιμότητα ενός υλικού μπορεί να μεταβληθεί από το ποσοστό της υγρασίας του υλικού.

6.Θερμική αδράνεια (P)

Είναι ένα μέτρο της θερμικής αντίστασης ενός υλικού στις θερμοκρασιακές αλλαγές και μετρείται σε (cal $/cm^{-2}$ $sec^{-1/2}$ $^oC^{-1}$). Η θερμική αδράνεια δίνεται από την εξίσωση:

$$P=\sqrt{\mathbf{Kpc_\rho}} \qquad (2.10)$$

Όπου *K* ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, p η πυκνότητα σε (g $/cm^{-3}$) και c_ρ η ειδική θερμότητα. Η πυκνότητα είναι πολύ σημαντική μεταβλητή σε αυτή την εξίσωση καθώς η θερμική αδράνεια αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού. Αντικείμενο με μικρή θερμική αδράνεια P και μικρή πυκνότητα ρ, χαμηλή αγωγιμότητα K και χαμηλή ειδική θερμότητα c_ρ, έχει υψηλή αντίσταση στις αλλαγές της θερμοκρασίας.

Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κατά την διάρκεια του 24 ώρου,-υψηλές θερμοκρασίες την ημέρα και χαμηλές την νύχτα-. Αντίθετα, υλικά με υψηλές τιμές θερμικής αδράνειας, εμφανίζονται ως ψυχροί στόχοι την ημέρα, και θερμοί την νύχτα.

Υλικό	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 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
Σερπεντίτης (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

Πίνακας 6: θερμικές ιδιότητες διαφόρων υλικών (Μερτίκας,1999)

Εκπομπή στόχου

Ένας στόχος δεν μπορεί να μελετηθεί σε απομόνωση. Το περιβάλλον εκπέμπει εξίσου ακτινοβολία. Όταν ένα αντικείμενο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον, το ποσό της ενέργειας που απορροφάται πρέπει να ισούται με το ποσό που ακτινοβολείται. Αλλιώς το αντικείμενο είτε ζεσταίνεται, είτε ψύχεται. Ο καλύτερος εκπομπός είναι η επιφάνεια η οποία είναι ο καλύτερος απορροφητής. Σε μια τέτοια επιφάνεια δεν θα ανακλαστεί η ακτινοβολία και θα απεικονιστεί μαύρο. Γενικότερα, η εκπομπή είναι υψηλότερη για τραχεία επιφάνεια και χαμηλότερη για ομαλή γυαλισμένη επιφάνεια. Ο

συντελεστής εκπομπής για ιδανικά μέλανα σώματα είναι μονάδα και μηδέν για τέλεια εκπεμπόμενες επιφάνειες.

Δυστυχώς η ανάκλαση είναι μια λειτουργία που εξαρτάται από την οπτική γωνία. Γενικά καθώς η γωνία θέασης αυξάνει, η ανάκλαση αυξάνει. Παρατηρώντας το δρόμο με μια γωνία που πλησιάζει τις 90° ο δρόμος παρουσιάζεται με αντανακλαστικός παρόλο που είναι φτιαγμένος από άσφαλτο.

Περιβαλλοντικές επιδράσεις

Μια μετρούμενη διάταξη χωρίς επαφή, όπως είναι τα οπτικά συστήματα απεικόνισης, δεν μπορούν να διαχωρίσουν την εκπεμπόμενη από την ανακλώμενη ενέργεια. Η ακτινοβολία που προέρχεται από μια επιφάνεια, περιλαμβάνει την ενέργεια που ανακλάται από τα περιβάλλον.

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Stefan-Boltzmann, η συνολική ενέργεια που προέρχεται από ένα αδιαφανές αντικείμενο:

$$M=\varepsilon\sigma T_T^4+\rho\sigma T_s^4, \qquad (2.11)$$

Όπου T_s είναι η θερμοκρασία από τα περιβάλλοντα αντικείμενα. Ττ η θερμοκρασία του στόχου, ε και ρ ο συντελεστής εκπομπής και ανάκλασης αντίστοιχα.

Είναι αδύνατο να μετρήσεις την ακτινοβολία από τα περιβάλλοντα αντικείμενα. Κάθε ένα έχει διαφορετικό σχήμα, απόσταση, προσανατολισμό, συντελεστή εκπομπής και θερμοκρασία.

3.2.4 Θερμικές υπέρυθρες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις

Κατά την ερμηνεία μιας θερμικής υπέρυθρης εικόνας, είναι χρήσιμο να γίνει κατανοητό ο ημερήσιος κύκλος και πως επηρεάζει την θερμοκρασία των αντικειμένων

στην επιφάνεια της γης. Η γωνία του ήλιου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγων διότι επηρεάζει όχι μόνο το ποσό του φωτισμού, που ανακλάται ή εκπέμπεται προς τον δέκτη αλλά και την ποιότητα του φάσματος. Όσο η γωνία και η ένταση του φωτισμού αλλάζει, το κοντράστ μεταξύ του αντικειμένου και του φόντου μεταβάλλεται. Επιπλέον οι σκιές τονίζονται στις μικρότερες γωνίες του ήλιου ώστε να μπορούν να παρατηρηθούν όρια. (Μπαντέκας, 1978)

Ο ημερήσιος κύκλος περιλαμβάνει 24 ώρες. Από την αυγή μέχρι την δύση το έδαφος απορροφά την εισερχόμενη μικροκυματική ακτινοβολία και αντανακλά μεγάλο μέγεθος αυτής πίσω στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, κάποια από την προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται από το έδαφος και επανεκπέμπεται πίσω στην ατμόσφαιρα σαν θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία (3-14μm). Η απερχόμενη κορυφή του μήκους κύματος συνήθως υστερεί 2-4 ώρες μετά την μεσημεριανή κορυφή της μικροκυματικής ακτινοβολίας λόγω του χρόνου που απαιτείται για την θέρμανση του εδάφους. Η εισερχόμενη και εξερχόμενη μικροκυματική ακτινοβολία γίνονται μηδέν μετά το ηλιοβασίλεμα, αλλά η εξερχόμενη μεγάλου μήκους ακτινοβολία από το έδαφος συνεχίζεται κατά την διάρκεια της νύχτας. Υπάρχουν δυο στιγμές κατά την διάρκεια της μέρας (μετά την ανατολή του ήλιου και κοντά στη δύση) όπου κάποια υλικά όπως έδαφος ,πετρώματα και νερό έχουν την ίδια ακτινοβολούμενη θερμοκρασία. Κατά την διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου διασταύρωσης δεν αποκτούνται θερμικά υπέρυθρα εξ αποστάσεως δεδομένα. Ευτυχώς κάποια υλικά αποθηκεύουν θερμοκρασία πιο αποτελεσματικά από κάποια άλλα, έχουν υψηλότερη θερμοχωρητικότητα. Για παράδειγμα, το νερό έχει πολύ υψηλότερη θερμοχωρητικότητα από το έδαφος και τα πετρώματα. Το ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος του νερού διακυμαίνεται πολύ λίγο όταν συγκρίνεται με τις δραματικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εδάφους και των πετρωμάτων κατά την διάρκεια ενός 24-ώρου.

Αν ενδιαφερόμαστε για την χαρτογράφηση της θερμοκρασίας του εδάφους που αποτελείται από πετρώματα και νερό, το έδαφος και τα πετρώματα θα εμφανιζόνταν πιο φωτεινά από ότι το νερό κατά την διάρκεια της μέρας εξαιτίας της υψηλότερης φαινομενικής θερμότητας. Τα πετρώματα και το έδαφος συνεχίζουν να ακτινοβολούν ενέργεια στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της νύχτας. Τα μεσάνυχτα αυτές οι επιφάνειες έχουν ακτινοβολήσει την περισσότερη θερμότητα που απορρόφησαν κατά την διάρκεια της μέρας και σταδιακά υποχωρούν σε φωτεινότητα. Αντίστροφα, το νερό με την

υψηλή θερμοχωρητικότητα, διατηρεί σχετικά σταθερή την θερμοκρασία επιφάνειας η οποία μπορεί να είναι υψηλότερη από το έδαφος τα πετρώματα (και το σκυρόδεμα) περίπου στις 4.00 π.μ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το νερό να εμφανίζεται φωτεινότερο κατά την διάρκεια της νύχτας σε θερμικές υπέρυθρες εικόνες απ' ότι απεικονίζεται το έδαφος, τα πετρώματα και η βλάστηση σε πολλές περιπτώσεις.

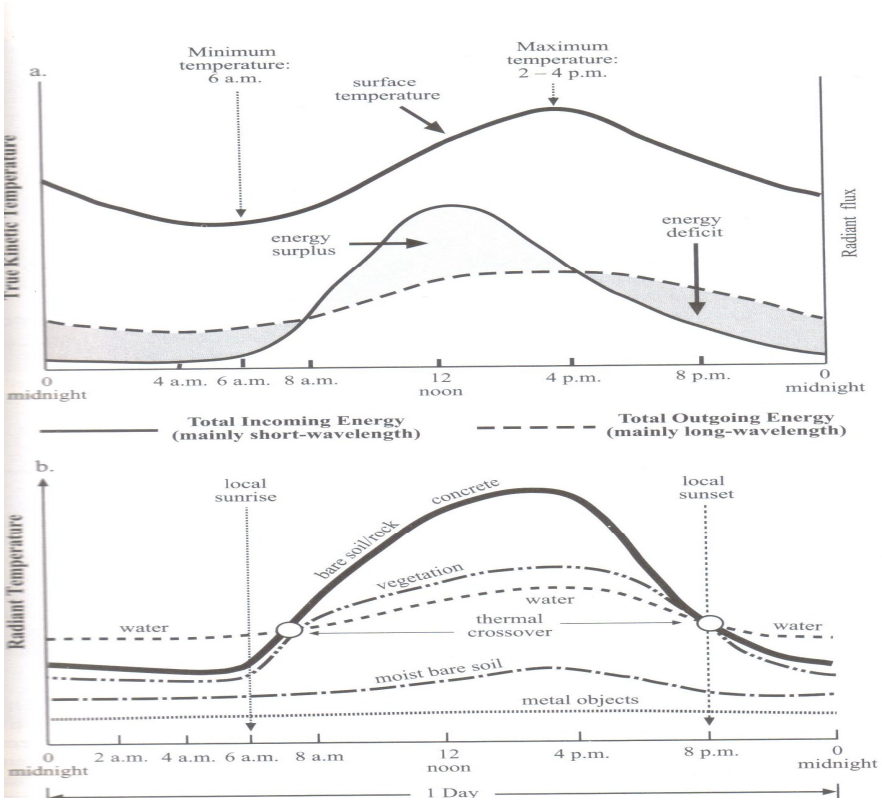
Τα πολύ υγρά εδάφη τείνουν να έχουν ένα σταθερό θερμοκρασιακό κύκλο, επειδή όσο περισσότερο υγρό είναι το έδαφος, τόσο υψηλότερη είναι η θερμοχωρητικότητά του. Μεταλλικά αντικείμενα όπως, αυτοκίνητα και στέγες αλουμινίου εμφανίζονται σκουρότερες και την μέρα και την νύχτα σε θερμικές υπέρυθρες εικόνες εξαιτίας του χαμηλού συντελεστή εκπομπής. Οι μεταλλικοί ανακλαστήρες είναι φτωχοί απορροφητές και ως εκ τούτου φτωχοί εκπομπείς. Στην πραγματικότητα είναι συχνά τα πιο σκούρα αντικείμενα σε μια εικόνα.

Οι επιστήμονες συγκεκριμένα προσπαθούν να υπολογίσουν θερμική αδράνεια , η οποία απαιτεί ημερήσιες και νυχτερινές εικόνες και συχνά προτιμούν να συλλέγουν εικόνες πριν από την αυγή επειδή:

1.Η μικροκυματική ανακλώμενη ενέργεια από τον ήλιο μπορεί να δημιουργήσει ενοχλητικές σκιές στις θερμικές υπέρυθρες εικόνες κατά την διάρκεια της ημέρας

2.Στις 4.00 π.μ, τα περισσότερα υλικά του εδάφους, έχουν σχετικά σταθερές θερμοκρασίες

3.Τα ρεύματα αέρος εμφανίζονται συνήθως νωρίς το πρωί επηρεάζοντας τις ακριβείς γραμμές πτήσεων, και δημιουργούν ραβδώσεις οι οποίες δεν είναι επιθυμητές στις εικόνες.



Εικόνα 5: Ο ημερήσιος κύκλος της εκπεμπόμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας και της ανακλώμενης μακροκυματικής ενέργειας.β) Η ημερήσια θερμοκρασιακή ακτινοβολία του γυμνού εδάφους, των πετρωμάτων του σκυροδέματος, της βλάστησης, του νερού υγρού γυμνού εδάφους, και μεταλλικών αντικειμένων.(Jensen 2007)

3.3 θερμικά συστήματα απεικόνισης

Η βασική ιδέα ενός μοντέρνου θερμικού συστήματος απεικόνισης είναι να σχηματίσει μια πραγματική εικόνα μιας υπέρυθρης σκηνής, να ανιχνεύσει τις διακυμάνσεις στην απεικονιζόμενη ακτινοβολία, και, με κατάλληλη ηλεκτρονική επεξεργασία, να δημιουργήσουν μια ορατή αναπαράσταση αυτής της διαφοροποίησης ανάλογα με τις συμβατικές κάμερες.

Τα συστήματα θερμικής απεικόνισης έχουν πολλές εφαρμογές που εξαρτώνται από την πλατφόρμα και τον χρήση. Τα περισσότερα από αυτά χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές. Η ελάχιστη διαχωρίσιμη διαφορά θερμοκρασίας (MRTD) θεωρείται σήμερα ως η πιο σημαντική παράμετρος των θερμικών συστημάτων απεικόνισης.

3.3.1 Υπέρυθρες κάμερες μέτρησης

Το βασικό συστατικό ενός υπέρυθρου συστήματος είναι μια υπέρυθρη κάμερα. Επειδή η ατμόσφαιρα έχει δύο ζώνες καλής διάδοσης στο υπέρυθρο φάσμα (μικρο-κυματική ζώνη μεταξύ 2 και 5 μm και μακρο-κυματική ζώνη μεταξύ 8 και 14 μm), οι περισσότεροι ανιχνευτές και υπέρυθρες κάμερες χωρίζονται σε μικρο-κυματικές (SW) και μακρο-κυματικές (LW) συσκευές. Υπάρχουν ανιχνευτές που λειτουργούν στο εγγύς υπέρυθρο (0.78-1.5μm), για παράδειγμα φωτοευαίσθητοι και ανιχνευτές φωτονίου, και ανιχνευτές που λειτουργούν στο άπω υπέρυθρο (20-1000μm), για παράδειγμα θερμικοί ανιχνευτές. Μια ακόμη ταξινόμηση καθορίζεται από τον τύπο του ανιχνευτή: υπάρχουν κάμερες με ψυχόμενους ανιχνευτές, που περιλαμβάνουν μια μονάδα ψύξης και μη-ψυχόμενοι ανιχνευτές που λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μέχρι το 1997, όλες οι υπέρυθρες κάμερες παράγονταν με εξοπλισμό ψυχόμενων ανιχνευτών, σε θερμοκρασίες από -70 (σπάνια) με -200°C (πιο συχνά).

Οι ανιχνευτές στις υπέρυθρες κάμερες χωρίζονται σε: σημειακούς ανιχνευτές, γραμμικούς και συστοιχία ανιχνευτών (FPA, Focal Plane Array) δημιουργήθηκαν ως μήτρες που αποτελούνται από 640x480 ατομικούς ανιχνευτές(pixels).

Κάμερες με ένα μόνο ανιχνευτή, ονομάζονται *σημειακοί ανιχνευτές σάρωσης ή* ***γραμμικοί ανιχνευτές σάρωσης***, αντίστοιχα. Σε αυτές τις κάμερες η εικόνα από το θερμοκρασιακό πεδίο δημιουργείται από οπτικομηχανικό σύστημα σάρωσης που βασίζεται πάνω σε περιστρεφόμενους ή ταλαντούμενους καθρέφτες ή πρίσματα σάρωσης. Η συχνότητα σάρωσης είναι συνήθως ίση με 25 Hz (50 Hz) για το σύστημα PAL στην Ευρώπη ή 30 Hz (60 Hz) για το σύστημα NTSC για την Αμερική.

Σε μια κάμερα μονού ανιχνευτή η εικόνα από την παρατηρούμενη περιοχή κτίζεται σημείο σημείο σε διαχρονικές χρονικές στιγμές. Η ακτινοβολία που φτάνει στον ανιχνευτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογα με την εκπομπή μεμονωμένων σημείων της εικόνας.

Η κατασκευή της κάμερας γραμμικής σάρωσης ήταν το επόμενο βήμα στην ανάπτυξη των θερμικών συστημάτων απεικόνισης. Τέτοια συστήματα έχουν μια μονάδα σάρωσης, είτε κάθετα είτε οριζόντια, που εξαρτάται με την τοποθέτηση του ανιχνευτή. Από το 1993 οι κάμερες έχουν εξοπλιστεί όλο και πιο συχνά με FPA ανιχνευτές. Μια τυπική διάταξη 640x480 βασίζεται πάνω σε 307200 μεμονωμένους ανιχνευτές. Κάθε εικονοστοιχείο διαβάζει 25 (50) (σύστημα PAL-Ευρώπη) ή 30 (60) (NTSC σύστημα ΗΠΑ) φορές ανά δευτερόλεπτο από το ROIC σύστημα ανάγνωσης.

Στις κάμερες με τους ανιχνευτές σε συστοιχία δεν υπάρχουν μηχανικά μέρη σάρωσης: Η μήτρα κοιτάζει σε ένα αντικείμενο διαμέσου των οπτικών της κάμερας. Η ανάπτυξη των γρήγορων ανιχνευτών σε συστοιχία επέτρεψε την κατασκευή καμερών που να είναι ικανές να καταγράψουν εξαιρετικά γρήγορες διεργασίες και την ανάπτυξη ενός νέου κλάδου που ονομάζεται εξαιρετικά γρήγορη θερμογραφία (ulterfast thermografy).

Αυτή την περίοδο υπάρχουν συστήματα υπερύθρων που μπορούν να καταγράψουν αρκετές εκατοντάδες θερμογράμματα ανά δευτερόλεπτο. *Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των υπέρυθρων καμερών ήταν η εισαγωγή το 1997 της πρώτης κάμερας με μικροβολομετρική σειρά από μη-ψυχόμενους ανιχνευτές.*

Λίγο αργότερα κατασκευάστηκαν πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές από μη-ψυχόμενες συστοιχίες. Η εξάλειψη της μηχανικής σάρωσης και της ψύξης βελτίωσε τις παραμέτρους λειτουργίας των υπέρυθρων καμερών, οι οποίες έγιναν ελαφρύτερες πιο αξιόπιστες και ικανές να λειτουργήσουν πιο γρήγορα. Η ψύξη του ανιχνευτή σε κρυογονική θερμοκρασία έπαιρνε πάνω από 10 λεπτά, ενώ η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας χωρίς ψύξη δεν υπερβαίνει το ένα λεπτό.

3.3.2 Συστήματα FLIR (Forward-Looking Infrared)

Κατά την διάρκεια του πόλεμου του κόλπου το 1991 και στον πόλεμο του Ιράκ στις αρχές του 2004 ο κόσμος είδε αρκετές υπέρυθρες εικόνες (FLIR) από το έδαφος και από διάφορους στόχους. Για δεκαετίες στρατιωτικοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει το σύστημα FLIR με το οποίο παρακολουθούν μπροστά και λοξά από ένα αεροσκάφος και παρέχουν υψηλής ποιότητας θερμική υπέρυθρη εικόνα, ειδικά την νύχτα. Κάποια συστήματα FLIR συλλέγουν την υπέρυθρη ενέργεια που βασίζεται στις ίδιες αρχές όπως ένας γραμμικός σαρωτής εκτός από τα σημεία του καθρέφτη τα οποία βρίσκονται σε γωνία 45° και σαρώνουν την ενέργεια από το έδαφος κατά ένα μόνο σκούπισμα του καθρέφτη σε μια γραμμική διάταξη των θερμικών υπέρυθρων ανιχνευτών.

Τεχνικά χαρακτηριστικά κάμερας

Εναλλάξιμωνφακών

Το B2 προσφέρει την ευελιξία του 34 ° φακού που είναι ιδανικός για την αξιολόγηση των μεγάλων αντικειμένων, όπως τοίχους και οροφές από μικρή απόσταση

Θερμική ευαισθησία είναι 0,10o C στους 25o C

Ανάλυση εικόνας 320 x 240 pixels

Φασματική περιοχή 7.5 με 13μm

Θερμοκρασιακό εύρος -20 ^{o} C με +100 ^{o} C

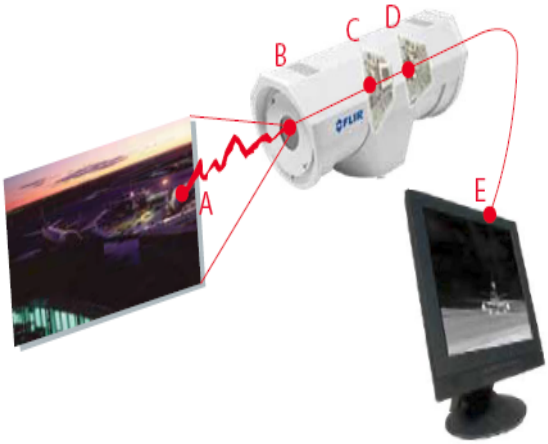
Θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας -15 ^{o} C με +50 ^{o} C

Θερμοκρασιακό εύρος αποθήκευσης -40 ^{o} C με +70 ^{o} C

ThermaCAM® B2

INFRARED CAMERA

Imaging Performance	
Field of view/min focus distance	34° x 25° / 0.1m
Thermal sensitivity	< 0.10° C at 25° C
Detector type	Focal plane array (FPA) uncooled microbolometer; 160 x 120 pixels
Spectral range	7.5 to 13 µm
Image Presentation	
Display	2.5" color LCD, 320 x 240 pixels in IR image
Video output	NTSC, standard RCA composite video
Image controls	Palettes (Iron, rainbow, high contrast rainbow, B/W, B/W inv), level, span, auto adjust (continuous/manual)
Set-up controls	Date/time, language (English, Spanish), info, LCD intensity (high/normal/low)
Temperature range	-20° C to +100° C (-4° F to +212° F)
Image Storage	
Digital storage functions	Freeze, Standard JPEG images, Delete all images, Delete image, Open
Image storage capacity	Approximately 200 JPEGS
Text annotation of images	Predefined text selected and stored together with image
Laser LocatIR	
Classification	Class 2
Type	Semiconductor AlGaInP Diode Laser: 1mW/635 nm (red)
Power Source	
Battery type	Li-Ion
Battery operating time	2 hours. Display shows battery status
Charging system	In camera, AC adapter or 12V from car with optional 12V cable. 2 bay intelligent charger included.
AC operation	AC adapter 90-360 VAC, 50/60 Hz / 12VDC out
Voltage	11-16 VDC
Power saving	Automatic shutdown and sleep mode (user-selectable)
Environmental	
Operating temperature range	-15° C to +50° C (+5° F to 122° F)
Storage temperature range	-40° C to +70° C (-40° F to 158° F)
Humidity	Operating and storage 20% to 80%, non-condensing, IEC 359
Water and dust resistant (encapsulation)	IP 54
Shock	25G, IEC 68-2-29
Vibration	2G, IEC 68-2-6
Physical Characteristics	
Weight	< 1.5 lbs. (0.7kg), including battery
Size (L x W x H)	265mm x 80mm x 105mm (10.4" x 3.2" x 4.1")
Color	Yellow
Tripod Mounting	Standard, 1/4" - 20
Cover Case	Plastic and rubber
Interfaces	
USB	Image transfer to PC
RS 232 cable (optional)	Image transfer to PC
Lenses (optional)	
Field of view/min focus distance	9° x 7° / 1.2m 19° x 14° / 0.3m
Measurement	
Measurement modes	Movable spot, area max, area min, area average, color alarm above or below.
Dew point alarm	Color or audible alarm



Η υπέρυθρη ενέργεια (A) που προέρχεται από ένα αντικείμενο, εστιάζεται από τα οπτικά (B) στον υπέρυθρο ανιχνευτή (C). Ο ανιχνευτής στέλνει την πληροφορία στον ηλεκτρονικό αισθητήρα για την επεξεργασία της εικόνας. Εκεί, μεταφράζονται τα δεδομένα που προέρχονται από τον ανιχνευτή σε εικόνα (E) η οποία μπορεί να προβληθεί σε οθόνη videoή σε LCD οθόνη ή σε οποιοδήποτε υπολογιστή.

Τα σύστηματα FLIR ανιχνεύουν την υπέρυθρη ακτινοβολία ή θερμότητα, δίνοντας την δυνατότητα στο χρήστη να βλέπει στο απόλυτο σκοτάδι, σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το ενδιαφέρον για τις υπέρυθρες εικόνες έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια σε διαφορετικά είδη αγορών. Οι θερμικές κάμερες είναι τα απόλυτα εργαλεία για απομακρυσμένα δίκτυα επιτήρησης, επειδή μπορούν να ανιχνεύσουν διαμέσου φωτός, ομίχλης και καπνού. Χρησιμοποιούνται για την ασφάλεια σπιτιών, πυρηνικών εγκαταστάσεων, αποθηκών, λιμανιών , αεροδρομίων. Κάποια συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν ανθρώπινο στόχο στα 100 μέτρα, ενώ κάποια άλλα σε μερικά χιλιόμετρα μακριά στο απόλυτο σκοτάδι.

Σχεδιασμός κάμερας

Παρουσιάζει πέντε βασικά υποσυστήματα: οπτικά και σαρωτής, ανιχνευτής και ανιχνευτής ηλεκτρονικών, ψηφιοποίηση, επεξεργασία εικόνας, ανασύνθεση εικόνας. Δεν είναι όλα τα συστήματα παρόντα σε όλες τις κάμερες. Η δομή του συστήματος εξαρτάται από το απαιτούμενο αποτέλεσμα. Ο ανιχνευτής είναι το κέντρο του συστήματος εικόνας επειδή μετατρέπει την υπέρυθρη ακτινοβολία σε ένα ηλεκτρικό σήμα μετρήσιμο, και την

χωρική πληροφορία στόχου, σε ηλεκτρική χρονική πληροφορία. Το σήμα ενισχύεται και επεξεργάζεται ώστε να δημιουργήσει μια εικόνα, όπου οι διαφορές των τάσεων θα απεικονίζονται ως διαφορές εντάσεων στην εικόνα

Η οθόνη μπορεί να αποτελεί ή όχι τμήμα του υπέρυθρου συστήματος απεικόνισης. Για ευκολία, οι στόχοι επισημαίνονται ψυχροί ή θερμοί. Ένας στόχος που απεικονίζεται πιο ζεστός από τον φόντο χαρακτηρίζεται θερμός ενώ αντίθετα ένας στόχος που είναι ψυχρότερος από το φόντο ψυχρός. Η επιλογή των θερμών αντικειμένων να απεικονίζονται λευκά και των ψυχρών να είναι μαύρα είναι αυθαίρετη. Με την ηλεκτρονική αντιστροφή πολικότητας διαθέσιμη, αυτό δεν είναι περιοριστικό. Μπορούν να δημιουργηθούν «άσπροι-θερμοί» ή «μαύροι-θερμοί» στόχοι. Με το «μαύρο-θερμό» θερμά αντικείμενα απεικονίζονται σκούρο γκρι σε ένα ουδέτερο περιβάλλον. Όσο το αντικείμενο γίνεται θερμότερο, η παρουσίαση στην οθόνη είναι πιο σκούρα. Το αντίστροφο ισχύει για το λευκό-θερμο.

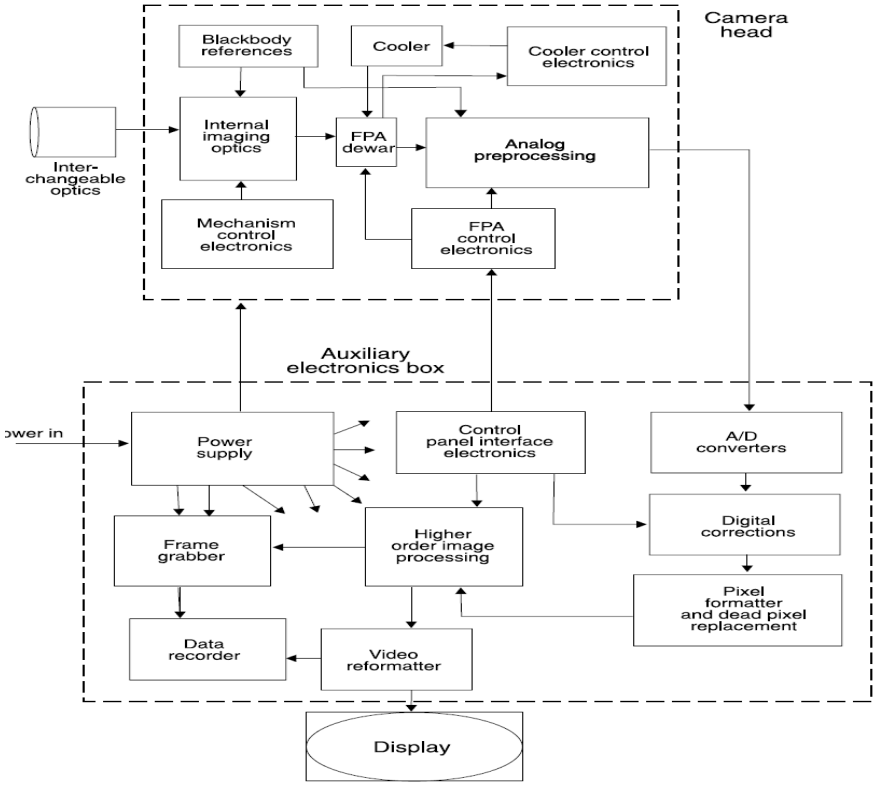
Η έξοδος του ανιχνευτή είναι απλά μια διαφορά δυναμικού. Αυτή η τάση μπορεί να χαρτογραφηθεί σε ψευδοχρώματα (δεν υπάρχει χρωματική πληροφορία που να σχετίζεται με την εικόνα). Θερμά αντικείμενα απεικονίζονται με μπλε χρώμα και θερμά σώματα με κόκκινο. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής αν η έξοδος θα παρουσιάζεται σε ψευδοχρώματα ή στην κλίμακα του γκρι . Αυτά τα χρώματα χρησιμοποιούνται για να τονίσουν χαρακτηριστικά.

3.3.3 Υπέρυθρες κάμερες έναντι κάμερες FLIR

Είναι δύσκολο να εντοπιστεί η διαφορά μεταξύ της κάμερας και ενός συστήματος FLIR. Γενικά τα συστήματα FLIR έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές και συγκεκριμένες πλατφόρμες, τα οπτικά τους είναι ενσωματωμένα, και ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους. Κάμερες που συνήθως βασίζονται στην απεικόνιση ενός στόχου, και χρησιμοποιούνται συχνά από τους υπολογιστές και τα μηχανήματα. Η FLIR προσφέρει αυτόματη αναζήτηση, εντοπισμό, ακρίβεια πλοήγησης και στις λειτουργίες των όπλων. Η εικόνα παρουσιάζει μια αντιπροσωπευτική κάμερα που αποτελείται από τέσσερα γραμμικά αντικαταστάσιμα στοιχεία, όπως τα οπτικά

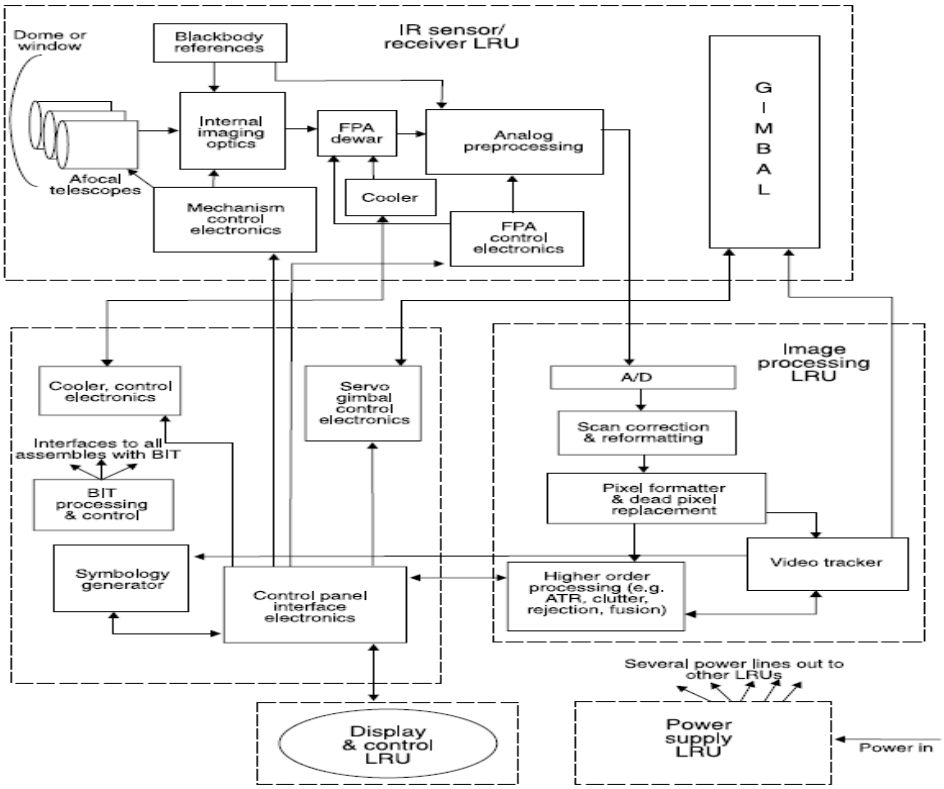
προσαρμοσμένα σε μια γυροσκοπική πλατφόρμα, ηλεκτρονικά που περιέχουν όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά κυκλώματα, κρυογενετικά ψυχόμενο ανιχνευτή συστοιχίας, μια μονάδα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στοιχεία φασματικού φιλτραρίσματος) ηλεκτρονικά ελέγχου, πλαίσιο επεξεργασίας και η οθόνη. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου συνήθως αποτελούνται από κυκλώματα επικοινωνίας, παραγωγούς γεννήτριας και ρολόγια. Συνήθως ο αισθητήρας κάμερας (FPA) χρειάζεται ψύξη και ως εκ τούτου κάποια μορφή ψύκτη περιλαμβάνεται, μαζί με κλειστό βρόγχο ψύξης ηλεκτρονικών ελέγχου. Το σήμα από το FPA είναι χαμηλής τάσης και έντασης και απαιτεί την ανάλογη προεργασία.[2]

Εικόνα 6: Δομή ενός τυπικού υπέρυθρου συστήματος (Rogalski, Chrzanowski 2002)



Οι κάμερες συνήθως παράγουν υψηλής ποιότητας απεικόνιση με NETD από 0.05 με 0.1^{o}C. Το 1960 τα πρώτα FLIRs ήταν γραμμικοί σαρωτές. Η επόμενη γενιά των FLIRs είχαν εγκατεστημένη μια πυκνή γραμμική συστοιχία φωτοβολταϊκών HgCdTe. Τα συστήματα αντικαθιστούνται από (PtSi, HgCdTe, InSb, και QWIP).

Η δομή της κάμερας FLIR αποτελείται από την κεφαλή σάρωσης, το τροφοδοτικό τον επεξεργαστή εικόνας, και την οθόνη εγγραφής. Αντιπροσωπευτική δομή κάμερας FLIR φαίνεται στο σχήμα. Πολλά συστήματα αποκλίνουν σημαντικά από τη δομή του σχήματος. Τα FLIRs συνήθως χρησιμοποιούν τηλεπισκόπια υπό τη έννοια ότι το σύστημα φακών επικεντρώνεται σε μια απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή. Τα χαρακτηριστικά όπως FOV, ανάλυση, μέγεθος στοιχείου και χωρική συχνότητα εκφράζεται σε μονάδες γωνίας. Κατά σύμβαση το FOV εκφράζεται σε μοίρες, η ανάλυση σε χιλιοστά του ακτινίου, και φασματική συχνότητα σε κύκλους ανά χιλιοστά ακτινίου και θόρυβο σε μονάδες θερμοκρασίας. Παγκοσμίως υπάρχουν πάνω από 100 διαφορετικά συστήματα FLIR σε λειτουργία.



Εικόνα 7: Δομή ενός συστήματοςFLIR (Rogalski, Chrzanowski 2002)

Οπτικό πεδίο (FOV)

Το οπτικό πεδίο FOV καθορίζεται από την περιοχή που μπορεί να παρατηρηθεί από μια απόσταση d χρησιμοποιώντας τα οπτικά της κάμερας. Η χωρική (γεωμετρική) απόκριση της θερμικής κάμερας μέτρησης ορίζεται από το FOV σε μέτρα και καθορίζει την ανάλυση σε οριζόντια (H) και κατακόρυφη (V) κατεύθυνση. Τυπικές τιμές των FOV σαν συνάρτηση της απόστασης d για 24^ox18^o δίνονται:

$$H=d\cdot\sin 24^o,\ (m)\quad V=d\cdot\sin 18^o,(m) \qquad (2.12)$$

Στιγμιαίο οπτικό πεδίο (IFOV)

Αυτό καθορίζει το FOV ενός εικονοστοιχείου, ονομάζεται και «ελάχιστο οπτικό πεδίο». Είναι η δεύτερη παράμετρος που καθορίζει τη χωρική (γεωμετρική) διακριτική ικανότητα της υπέρυθρης κάμερας μέτρησης, αναφέρεται και ως χωρική ανάλυση. Για παράδειγμα, FOV H x V σε απόσταση d=1m με μια κάμερα 24° x 18° οπτικών είναι 0.41 x 0.31 m. Αν η κάμερα έχει μια μήτρα 320 x 240 ανιχνευτών, το FOV ενός ανιχνευτή είναι

$$0.41/320 = 0.31/240= 1.3mm \cdot 1.3mm \qquad (2.13)$$

Αυτό σημαίνει ότι σε μια απόσταση 1m τέτοια κάμερα μπορεί να αναγνωρίσει λεπτομέρειες όπως τοπικές αυξήσεις θερμοκρασίας 1.33mm με 1.3mm.

Η παράμετρος IFOV είναι στιγμιαίο οπτικό πεδίο σε σχέση με την απόσταση, επομένως για d=10m στο παραπάνω παράδειγμα θα είναι 13mm με 13 mm. Προφανώς μπορεί να ανιχνεύσει την υπερθέρμανση σε μικρότερη έκταση αλλά δεν θα έχει την ίδια ακρίβεια θερμοκρασίας.

Η χωρική ανάλυση μιας κάμερας εξαρτάται από τα εφαρμοσμένα οπτικά και τον αριθμό των ανιχνευτών (εικονοστοιχείων) της συστοιχίας. Όσο μικρότερη είναι η οπτική γωνία (flare), και μεγαλύτερος ο αριθμός των εικονοστοιχείων, τόσο καλύτερη είναι η χωρική ανάλυση της κάμερας.

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του IFOV βασίζεται στον καθορισμό της οπτικής γωνίας (σε ακτίνια) σε μονό ανιχνευτή.

Για H=d·sin(0.0013)=1.3mm

$$\alpha_{radH} = \frac{24\pi}{180 \cdot 320} = 0.0013 \text{ rad}, \tag{2.14}$$

Και για V=d·sin(0.0013)=1.3mm

$$\alpha_{radV} = \frac{18\pi}{180 \cdot 240} = 0.0013 \text{ rad} \tag{2.15}$$

Η χωρική ανάλυση μιας κάμερας εκφράζεται συνήθως σε χιλιοστά ακτινίου (mrads). [3]

3.4 Ανιχνευτές

3.4.1 Λειτουργία ανιχνευτή

Οι ανιχνευτές κατηγοριοποιούνται στους κλασσικούς ημι-αγωγούς, στους ημι-αγωγούς novel και στους θερμικούς ανιχνευτές. Οι παράμετροι της λειτουργίας ανίχνευσης και για αυτό το λόγο οι παράμετροι λειτουργίας του συστήματος, αναπτύχθηκαν για τους κλασσικούς και ημι-αγωγούς και για τους θερμικούς ανιχνευτές.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υπέρυθρων ανιχνευτών:

Κλασσικοί ημι-αγωγοί

- Φωτοαγώγιμοι
- Φωτοβολταικών

Novel ημι-αγωγοί

- Schottky φράγμα φωτοδιόδου
- Μηχανικοί φωτοανιχνευτές Bandgap

Θερμικοί ανιχνευτές

- Βολόμετρο
- Πυροηλεκτρικοί

Ανινχευτές φωτονίων

Θερμικοί ανιχνευτές

Η δεύτερη κατηγορία των υπέρυθρων ανιχνευτών αποτελείται από θερμικούς ανιχνευτές. Σε κάθε θερμικό ανιχνευτή η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται για να αλλάξει την θερμοκρασία του υλικού και η επακόλουθη αλλαγή σε κάποιες φυσικές ιδιότητες, χρησιμοποιείται για να παράξει ηλεκτρική ισχύ. Το στοιχείο του ανιχνευτή διακόπτεται προσωρινά σε χρονική υστέρηση, και συνδέεται με τον απαγωγέα θερμότητας

(ψύχτρα). Οι θερμικές επιδράσεις είναι γενικά ανεξάρτητες του μήκους κύματος. Το σήμα εξαρτάται από την ακτινοβολούμενη ισχύ, αλλά όχι από το φασματικό περιεχόμενό του. Στους πυροηλεκτρικούς ανιχνευτές, μια αλλαγή στην εσωτερική πόλωση μετριέται ενώ στο βολόμετρο, μια αλλαγή στην εσωτερική αντίσταση μετριέται. Σε αντίθεση με τους ανιχνευτές φωτονίων, οι θερμικοί ανιχνευτές συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου. Θερμικοί ανιχνευτές γενικά έχουν πολύ χαμηλότερη ευαισθησία από τους ανιχνευτές φωτονίων. Ως εκ τούτου σε μια εφαρμογή με χαμηλό λόγο σήματος- θορύβου δεν θα χρησιμοποιηθούν ανιχνευτές φωτονίων. Συνήθως χαρακτηρίζονται από μέτρια ευαισθησία και χαμηλή απόκριση αλλά είναι φθηνοί και εύκολοι στη χρήση. Τυπικές τιμές της ανιχνευσιμότητας των θερμικών ανιχνευτών στα 10 Hz είναι στο εύρος μεταξύ 10^8 με 10^9 $cmHz^{1/2}$ W^{-1}.

Μέχρι την δεκαετία του 90 οι θερμικοί ανιχνευτές είχαν λιγότερο αξιοποιηθεί σε εμπορικά και στρατιωτικά συστήματα σε σχέση με τους ανιχνευτές φωτονίων. Κατά την τελευταία δεκαετία ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι εξαιρετικά καλής ποιότητας εικόνες μπορούν να ληφθούν από μεγάλες συστοιχίες θερμικών ανιχνευτών που λειτουργούν μη ψυχόμενοι σε ταχύτητες καρέ τηλεόρασης. Η ταχύτητα των θερμικών ανιχνευτών είναι αρκετά επαρκής για συστήματα απεικόνισης μη-σάρωσης με δυο διαστάσεων ανιχνευτές. Η μέτρια ευαισθησία από τους θερμικούς ανιχνευτές μπορεί να αντισταθμιστεί από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων, σε 2D συστοιχίες οπτικής ανάγνωσης. Με μεγάλες συστοιχίες θερμικών ανιχνευτών, μπορούν να επιτευχθούν καλύτερες τιμές της NEDT κάτω από 0.1 K επειδή μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικό εύρος ζώνης θορύβου κάτω από 100 Hz.

Πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές μπορούν να ανιχνεύσουν μόνο θερμοκρασιακές μεταβολές. Η ηλεκτρική πολικότητα μεταβάλλεται από αυτή την αλλαγή θερμοκρασίας, που εμφανίζεται σαν διαφορά δυναμικού. Αυτές οι AC συσκευές δημιουργούν ένα φωτεινό στεφάνι γύρω από στόχους με διαφορά θερμοκρασίας. Για να απεικονιστεί η εικόνα με ομοιομορφία συγχρονίζεται το καρέ της κάμερας με το κύκλωμα.

Ανιχνευτές φωτονίων

Στην κατηγορία των ανιχνευτών φωτονίων, η ακτινοβολία απορροφάται στο εσωτερικό του υλικού, από την αλληλεπίδραση με τα ηλεκτρόνια. Το παρατηρούμενο ηλεκτρικό σήμα εξόδου, είναι αποτέλεσμα από την αλλαγή της διανομής ηλεκτρονικής ενέργειας. Οι ανιχνευτές φωτονίων δείχνουν μια επιλεκτική εξάρτηση από το μήκος κύματος της αντίδρασης ανά μονάδα ακτινοβολίας της ισχύς. Για να επιτευχθεί γρήγορη απόκριση, οι ανιχνευτές φωτονίων απαιτούν κρυογενετική ψύξη. Οι απαιτήσεις για την ψύξη, είναι το κύριο εμπόδιο για την ευρύτερη χρήση των υπέρυθρων συστημάτων που βασίζονται σε ημιαγωγούς ανιχνευτές και τα καθιστούν ογκώδη, βαριά, ακριβά και δύσκολα στη χρήση. Ανάλογα με την φύση της αλληλεπίδρασης, οι ανιχνευτές φωτονίων υποδιαιρούνται περεταίρω στους: εγγενείς ανιχνευτές (HgCdTe, InGaAs, InSb, PbS, PbSe) και στους εξωγενείς ανιχνευτές όπως (Si:As, Si:Ga), φωτοεκπομπείς (Schottky)και κβσντικοί ανιχνευτές (GaAs /AlGaAs/QWIPs)

3.4.2 Παράμετροι ανιχνευτή

Το μέγεθος που έχει σημασία για τους ανιχνευτές είναι η *ανιχνευσιμότητα*. Έχει βρεθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις αυτή η παράμετρος είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ευαίσθητης περιοχής του ανιχνευτή A, και το ηλεκτρονικό εύρος ζώνης Δf. Για να απλοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ διαφόρων ανιχνευτών, έχει εισαχθεί ο ακόλουθος ορισμός:

$$D^* = \frac{(A\Delta f)^{1/2}}{\Phi_e}(SNR) \qquad (2.16)$$

Όπου $\mathbf{\Phi_e}$ είναι η φασματική ισχύς ακτινοβολίας. $\mathbf{D^*}$ ορίζεται ως ο λόγος σήματος-θορύβου (SNR) σε εύρος ζώνης 1 Hz ανά μονάδα rms και ανα τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας του ανιχνευτή, και εκφράζεται σε $cm/Hz^{1/2}W^{-1}$. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κυρίως στα μήκη κύματος των δυο ατμοσφαιρικών διαύλων 3-5 μm και 8-14μm, αν και τα

τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για μεγαλύτερα μήκη κύματος από τις διαστημικές εφαρμογές.

Απόκριση

Η απόκριση περιγράφει την αλλαγή της τιμής της μεταβλητής εξόδου εξαιτίας της αλλαγής στην μεταβλητή εισόδου . Για τους θερμικούς υπέρυθρους ανιχνευτές αυτή η τιμή εισόδου είναι η ροή ακτινοβολίας $\mathbf{\Phi_s}$ και η μεταβλητή εξόδου είναι η τάση εξόδου $\mathbf{V_S}$ και το ρεύμα εξόδου $\mathbf{I_s}$. Ο ορισμός της τάσης απόκρισης προκύπτει:

$$R_V = \frac{\Delta V_S}{\Delta \Phi_S} \qquad (2.17)$$

Η αλλαγή της τάσης εξόδου ΔV_S προκαλείται από την αλλαγή της της ροής ακτινοβολίας $\Delta \Phi_S$. Η μονάδα της τάσης απόκρισης είναι V/W. Υπάρχει ένας ανάλογος ορισμός της τρέχουσας απόκρισης R_I για ανιχνευτές με το ρεύμα I_S σαν μεταβλητή εξόδου.

$$R_I = \frac{\Delta I_S}{\Delta \Phi_S} \qquad (2.18)$$

Με μονάδα A/W.

Για εφαρμογές αισθητήρων στα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας η σχετική-θερμοκρασιακή απόκριση ενός μέλανος σώματος είναι πολύ σημαντική.Αυτή η απόκριση R_T είναι η κλίση της συνάρτησης μεταφοράς του σήματος (SiTF). Για αισθητήρες με διάφορες περιοχές ευαισθησίας (στοιχεία εικόνας ή pixels) επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να αναφερθεί η ομοιομορφία.

Φασματική απόκριση

Η φασματική απόκριση R_λ περιγράφει την εξάρτηση του μήκους κύματος από την απόκριση του ανιχνευτή.

$$R_\lambda = \frac{\Delta V_S}{\Delta \Phi_\lambda} \tag{2.19}$$

Η αρχή μέτρησης της φασματικής απόκρισης αντιστοιχεί σε αυτή της μαύρης απόκρισης μόνο που η πηγή ακτινοβολίας είναι διαφορετική.

Ομοιομορφία

Η ομοιομορφία περιγράφει την διαφορά μεταξύ επιμέρους pixels. Συγκεκριμένα, αυτό αναφέρεται στο λειτουργικό σημείο και στην απόκριση. Η ομοιομορφία περιέχει την μέση τιμή, την τυπική απόκλιση, τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές, οριακές τιμές και τα εκτός λειτουργίας εικονοστοιχεία. Εκτός λειτουργίας είναι τα εικονοστοιχεία με τιμές εκτός των ανεκτών ορίων και ονομάζονται «νεκρά pixel». Το ανώτατο επιτρεπτό όριο για τον αριθμό των νεκρών pixel είναι το 1%. Για μικροβολόμετρα, με 384x 288 pixels αντιστοιχεί σε 1105 νεκρά εικονοστοιχεία.

Θόρυβος-ισοδύναμη ισχύς θορύβου NEP

Ο θόρυβος- ισοδύναμη ισχύς θορύβου NEP είναι η ροή ακτινοβολίας που παράγει μια αναλογία σήματος-θορύβου στην έξοδο του ανιχνευτή:

$$NETD = \frac{\tilde{v}_R}{\Delta V_S} \Delta T \tag{2.25}$$

η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (T_0) και του αντικειμένου με θερμοκρασία T_{BB}.

$$\Delta T = T_{\mathrm{BB}} - T_0 \tag{2.26}$$

Η διαφορά σήματος, προκύπτει από τις χρονικές μέσες τιμές των τάσεων θορύβου.

$$\Delta V_{\mathrm{S}} = \bar{V}_{\mathrm{BB}} - \bar{V}_0 \tag{2.27}$$

Η τάση θορύβου V_R είναι η ενεργή τιμή της τάσης του θορύβου του αισθητήρα. Για SNR ίσο με 1, το NETD είναι η μικρότερη ανιχνεύσιμη θερμοκρασιακή διαφορά σε αυτό το σενάριο. Για να μετρήσουμε το NETD διαλέγουμε μια μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά.

3.4.3 Οπτικοί παράμετροι

Το μετρούμενο πεδίο της ακτινοβολίας του αισθητήρα καθορίζεται από τα διαφράγματα και το οπτικό σύστημα απεικόνισης. Τα διαφράγματα καθορίζουν το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή, για αυτό χρησιμοποιούνται με σκοπό να καθορίσουν τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή. Στην εικόνα παρουσιάζονται οι γεωμετρικές σχέσεις. Τα οπτικά περιγράφονται από τα κύρια επίπεδα H και H' και από τα κομβικά σημεία Fκαι F'. Επιπρόσθετα, χρειαζόμαστε την διάμετρο της κόρης του οφθαλμού D_o για να υπολογίσουμε τα οπτικά. Οτιδήποτε δεν ανήκει στο αντικείμενο είναι μέρος του φόντου. Το μέγεθος της σκηνής L, καθορίζεται από το οπτικό πεδίο FOV και την απόσταση R από την σκηνή στα οπτικά, πιο συγκεκριμένα για το κύριο επίπεδο H των οπτικών:

(2.19)

$$L = 2\,R \tan\frac{FOV}{2}$$

L: μέγεθος της σκηνής

I: μέγεθος του ανιχνευτή

A: μέγεθος αντικειμένου

a : μέγεθος εικονοστοιχείου

R: απόσταση σκηνής- οπτικών

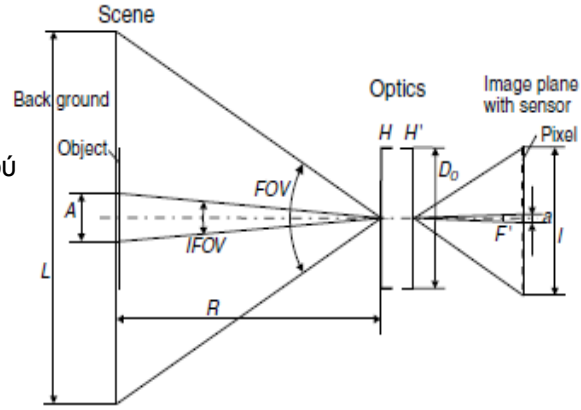
H,H΄: κύρια επίπεδα συμμετρίας

D_o: διάμετρο εισόδου από την κόρη οφθαλμού

F': εστιακό επίπεδο εικόνας

FOV: οπτικό πεδίο

IFOV: στιγμιαίο οπτικό πεδίο



Εικόνα 11:Οπτικογεωμετρικές σχέσεις σε μια διάταξη ανιχνευτή (Budzier,Gerlach 2007)

Σε μια σκηνή, το μέγεθος A ενός εικονοστοιχείου δίνεται από το στιγμιαίο οπτικό πεδίο του εικονοστοιχείου (IFOV).

$$A = 2R\tan\frac{IFOV}{2} \tag{2.20}$$

FOV προκύπτει από το μέγεθος του αισθητήρα μεγέθους l και το εστιακό μήκος f' των οπτικών:

$$FOV = 2\arctan\frac{l}{2f'} \tag{2.21}$$

Το οπτικό πεδίο δίνεται συνήθως σε ακτίνια. Η ακτινοβολία μιας περιοχής αισθητήρα πίσω από τα οπτικά εξαρτάται από το ποσό της ακτινοβολίας που διαπερνά τα οπτικά. Η φωτεινότητα των οπτικών αναφέρεται με τον αριθμό f.

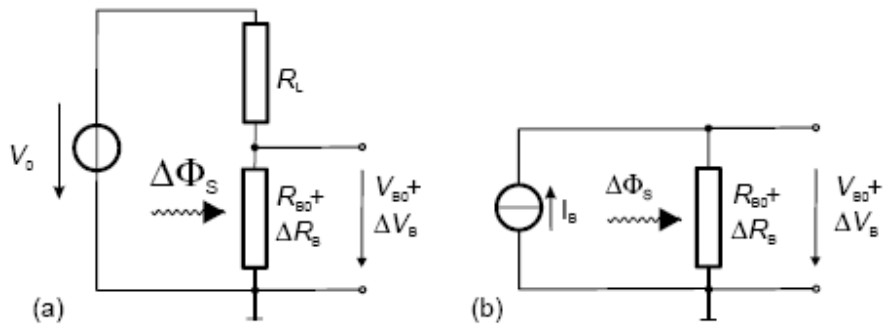
$$F = \frac{f'}{D_0} \tag{2.23}$$

3.4.4 Μικροβολόμετρα

Βολόμετρα είναι υπέρυθροι αισθητήρες που η θερμοκρασιακή αλλαγή ΔT_S λόγω την μεταβολή στην απορροφούμενη ροή ακτινοβολίας $\Delta\Phi_S$ προκαλεί μεταβολή στην αντίσταση R_B.

Αξιολογούμε την αλλαγή τάσης ΔV_B που παράγεται από ρεύμα λειτουργίας I_B και ρέει μέσω της αντίστασης R_B. Η αλλαγή της αντίστασης του βολόμετρου ΔR_B προκαλείται από την μεταβολή της θερμοκρασίας και συχνά περιγράφεται με το συντελεστή θερμοκρασίας α_β (συνήθως χάριν συντομίας είναι ο TCR: συντελεστής θερμοκρασιακής αντίστασης)

$$\alpha_B = TCR = \frac{1}{R_B}\frac{dR_B}{dT_S} \tag{2.24}$$



<u>Εικόνα11:</u> Δυο βασικά κυκλώματα για τον καθορισμό της αντίστασης βολομέτρου. Α) με φορτίο αντίστασης R_L και σταθερή τάση λειτουργίας β) με σταθερή πηγή ρεύματος I_B (Budzier,Gerlach 2007)

Η εξάρτηση της θερμοκρασίας από την αντίσταση του βολόμετρου διακρίνεται σύμφωνα με μέταλλα και ημιαγώγιμα υλικά.Τα μέταλλα έχουν θετικό TCR. Με την αύξηση της θερμοκρασίας οι ταλαντώσεις στο μεταλλικό πλέγμα μειώνονται. Αυτό μειώνει την ελεύθερη διαδρομή των ηλεκτρονίων και αυξάνει την αντίσταση στο βολόμετρο. Κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ισχύει ότι:

$$R_B(T) = R_{B0}(1 + \alpha_B \Delta T_S) \quad (2.25)$$

Με την αντίσταση αναφοράς

$$R_{B0}=R_B(T_0) \quad (2.26)$$

Στο σημείο λειτουργίας η θερμοκρασία T_0 και η θερμοκρασιακή αλλαγή

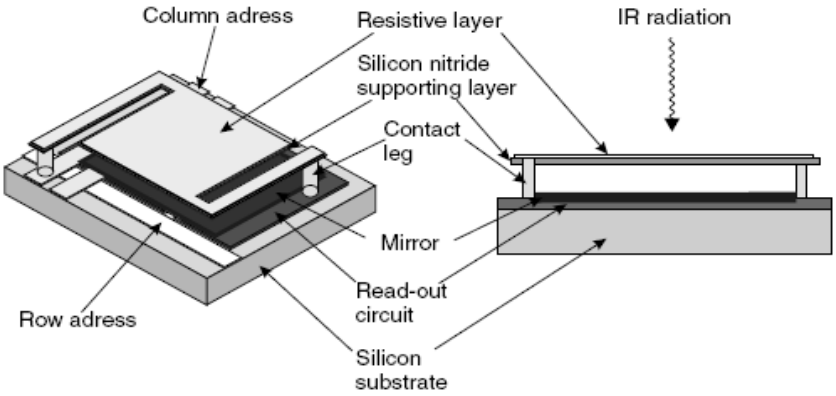
$$\Delta T_S = T_S - T_0 \quad (2.27)$$

Όπου T_S είναι η θερμοκρασία του ανιχνευτή.

3.4.4.1 Σχεδιασμός μιας μικροβολομετρικής διάταξης

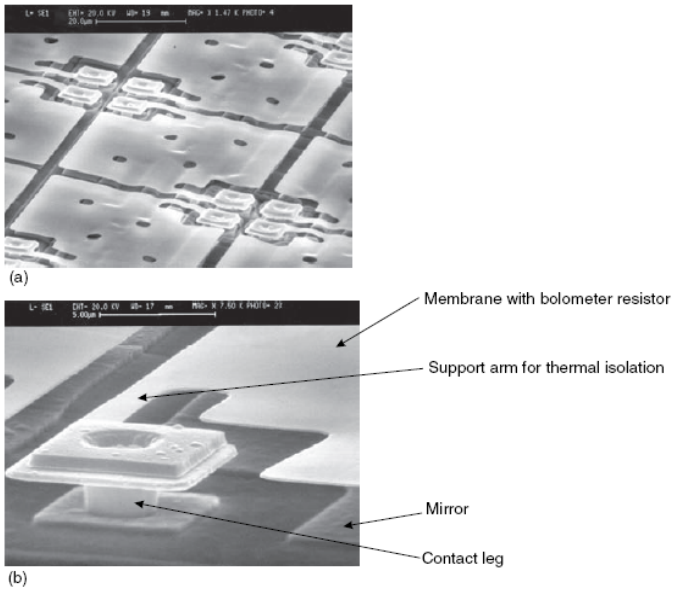
Προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη θερμομόνωση, τα μικροβολόμετρα, κατασκευάζονται ως μικρογέφυρες στο κενό. Η εικόνα δείχνει την απλοποιημένη διάρθρωση ενός εικονοστοιχείου. Η περιοχή των εικονοστοιχείων συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 15 x15μm^2 kai 55x55 μm^2.Η εικόνα 2 είναι μια εικόνα της πραγματικής δομής της γέφυρας ενός a-Si μικροβολόμετρο.

Η δομή της γέφυρας αποτελείται από δύο βραχίονες στήριξης(πόδια) για ηλεκτρική σύνδεση, μια μεμβράνη ως υπόστρωμα και η αντίσταση του βολόμετρου που έχει αποτεθεί σε αυτό. Επιπλέον υπάρχουν και άλλα στρώματα για την απορρόφηση της προσπίπτουσας υπέρυθρης ακτινοβολίας ή για την μηχανική σταθεροποίηση της γέφυρας. Το πάχος της γέφυρας ανέρχεται σε μερικά 100nm. Προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή θερμομόνωση της βολομετρικής αντίστασης, ολόκληρη η δομή βρίσκεται στο κενό. Οι βραχίονες στήριξης συμβάλλουν στην θερμομόνωση επίσης, με την αναστολή της βολομετρικής αντίστασης. Η απόσταση της γέφυρας στην επιφάνεια του τσιπ ή στην επιφάνεια του ανακλαστήρα ανέρχεται



Εικόνα 12: Δομή ενός μικροβολομετρικού pixel. (Budzier,Gerlach 2007)

α)



Εικόνα13: Εικόνα μιας δομής μικροβολομετρικής γέφυρας συνολική εικόνα πολλών εικονοστοιχείων β) λεπτομέρεια της εικόνας ύψος pixel 50μm, ύψος γέφυρας 2.5μm. (courtesy of ULIS, Veurey Voroize, France)

σε περίπου 2.5μm. Γέφυρες και ανακλαστήρες λειτουργούν σαν οπτικοί συντονιστές που απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα ηλεκτρονικά ανάγνωσης βρίσκονται κάτω από την γέφυρα.

Μετρώντας την απόκριση διάταξης μικροβολόμετρου

Μετράμε την απόκριση μιας διάταξης μικροβολόμετρου, για θερμοκρασία μέλανου σώματος 30° C (T_{BB}). Για αυτό το σκοπό τοποθετούμε την διάταξη μικροβολόμετρου σε μια

απόσταση d=50mm μπροστά από ένα μέλαν σώμα. Είναι συνήθης πρακτική, ο καθορισμός των παραμέτρων της συστοιχίας με έναν αριθμό f όπου F=1. Η ακτίνα του μελανού σώματος είναι:

R_{BB}=25mm

Καθορίζουμε μέγεθος pixel 25 x 25 μm^2 (περιοχή pixel A=6.25 x 10^{-10} m^2). Όσο η περιοχή του pixel είναι μικρότερη από την εκπεμπόμενη περιοχή A_{BB}= 1.96 x 10^{-3} m^2, μπορούμε να θεωρήσουμε διαφορετικό στοιχείο μικρής περιοχής. Η ροή ακτινοβολίας στο εικονοστοιχείο δίνεται:

$$\Phi_S = \frac{\varepsilon\,\sigma\,T_{BB}^4}{4\,k^2+1} A_S \tag{2.30}$$

Για να καθορίσουμε την απόκριση, χρησιμοποιούμε την διαφορά ακτινοβολιών, μεταξύ δυο διαφορετικών θερμοκρασιών μελανών σωμάτων. Για αυτό, δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε την ροή ακτινοβολίας που ανταλλάσσεται μεταξύ του μέλανου σώματος και του αισθητήρα. Η ακτινοβολία του αισθητήρα δεν περιλαμβάνεται εξαιτίας αυτής της διαφοράς στον υπολογισμό. Χρησιμοποιούμε την θερμοκρασία περιβάλλοντος (π.χ 25°C) ως την θερμοκρασία του δεύτερου μέλανου σώματος. Για ε=0.98, η διαφορά ακτινοβολίας που ζητάμε είναι:

$$\Delta\Phi_S = \Phi_S(30^\circ\mathrm{C}) - \Phi_S(25^\circ\mathrm{C}) = 58.7\,\mathrm{nW} - 54.9\,\mathrm{nW} = 3.8\,\mathrm{nW}.$$

(2.31)

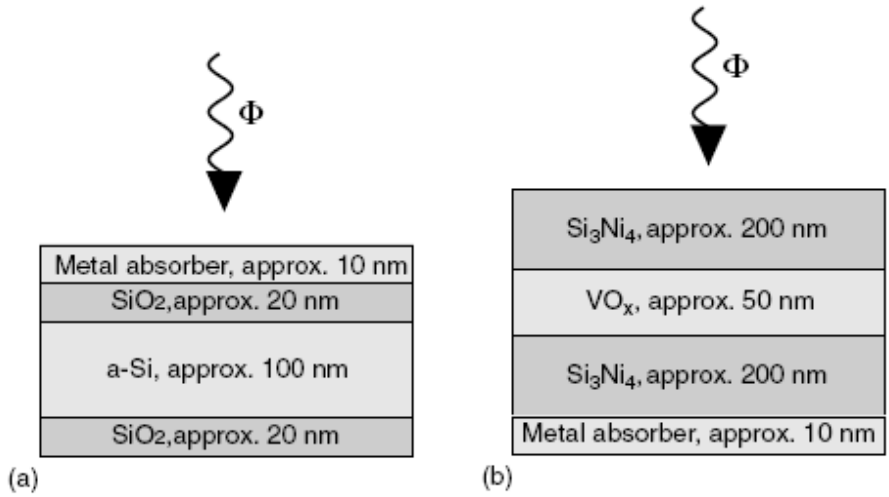
Οι ακόλουθες τιμές που μετράμε σαν τάση εξόδου του αισθητήρα είναι:

$V_S(25^\circ\mathrm{C}) = 2.4567\ \mathrm{V}$ και $V_S(30\,^\circ\mathrm{C}) = 2.4601\ \mathrm{V}$

(2.32)

Οι μετρούμενες τιμές περιλαμβάνουν την τάση πόλωσης του pixel. Η τάση απόκρισης είναι:

$$R_V(30°C) = \frac{3.4\ \mathrm{mV}}{3.8\ \mathrm{nW}} = 894\,737\ \mathrm{V/W}. \tag{2.33}$$



<u>Εικόνα 13</u>: Συστήματα στρωμάτων μικροβολομετρικής γέφυρας α) a-Si b)VO_X (Budzier,Gerlach 2007)

Κεφάλαιο 4

4.1 Μετρήσεις πεδίου

4.1.1Περιγραφή μετρήσεων πεδίου

Αρχικά στον κύριο κορμό του φράγματος, πραγματοποιήθηκε η λήψη θερμικών εικόνων με υπέρυθρη κάμερα χειρός τύπου thermCAM B2, της οποίας τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η κάμερα βαθμονομήθηκε συγκριτικά με υπέρυθρο θερμόμετρο για την αποδοτικότερη λειτουργία της. Η λήψη των εικόνων έγινε από δύο διαφορετικά σημεία, σε απόσταση 150 m και 70m περίπου σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, το μεσημέρι (12:00) και πριν την ανατολή του Ήλιου. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν αυτές οι ώρες, είναι η διαφορετική θερμική αδράνεια (ο διαφορετικός ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας), των πετρωμάτων του χωμάτινου φράγματος σε σχέση με το νερό του ταμιευτήρα ανάντι του φράγματος. Οι μετρήσεις έγιναν τέλη Αυγούστου με αρχές Σεπτεμβρίου, όπου το πρώτο σημείο έδωσε έξι εικόνες και το δεύτερο λόγω εγγύτερης απόστασης τέσσερις.

Για την γεωμετρική διόρθωση των εικόνων τοποθετήθηκαν 11 φωτοσταθερά, ώστε κάθε εικόνα να έχει τέσσερα σταθερά σημεία για την διόρθωσή της. Τα φωτοσταθερά, τα οποία ήτανε μεταλλικά κουτιά, με την προσθήκη κεριών στο εσωτερικό τους, απεικονίζονται ως θερμά –φωτεινά σημεία- στην εικόνα εξαιτίας της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς σε σχέση με τα περιβάλλοντα πετρώματα. Στις 6:30 το πρωί τα περιβάλλοντα πετρώματα έχουν θερμοκρασία 14,7-15° C, ενώ τα φωτοσταθερά έχουν μια μέση θερμοκρασία 45-50 ^{o} C. Η επιλογή του μεταλλικού κουτιού έγινε εξαιτίας της γρήγορης θέρμανσης. Επιπρόσθετα, το υλικό κατασκευής επιτυγχάνει και γρήγορη ψύξη ώστε να είναι εύκολη η μετακίνησή του σε άλλο σημείο. Τα μεταλλικά υλικά είναι υλικά με υψηλή θερμική αδράνεια, και ως αποτέλεσμα θερμαίνονται και ψύχονται τάχιστα. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έπειτα από μετρήσεις 24 ώρου από μετεωρολογικό σταθμό είναι περίπου 17 ^{o} C το πρωί, ενώ το μεσημέρι 35-37 ^{o} C.

Με υπέρυθρο θερμόμετρο μετρήθηκε η θερμοκρασία της επιφάνειας των πετρωμάτων (in situ) ασβεστολίθων στις 6:30’ το πρωί 15-14,7 ^{o} C στο ανώτερο μέρος του φράγματος όπου οι παρατηρούνται μικρότεροι όγκοι ασβεστολίθων. Η επιφανειακή θερμοκρασία των

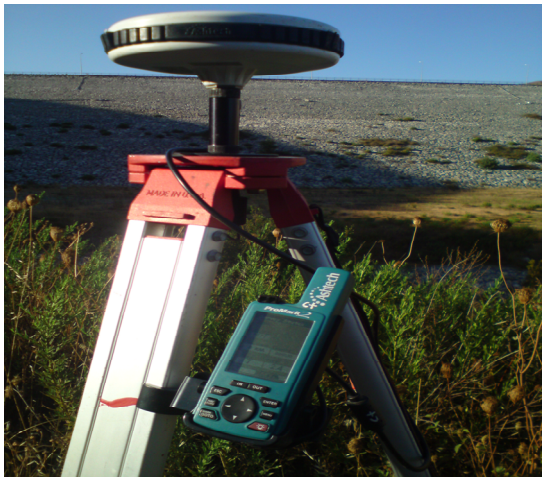
ασβεστολίθων κυμαίνεται και εξαρτάται από το χρώμα, τον όγκο τους και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία στα διάκενα μεταξύ των μικρών όγκων κυμαίνεται από 19-19,5 ^{o} C. Στους μεγαλύτερους όγκους στην κάτω μεριά του μετώπου η επιφανειακή θερμοκρασία είναι 15-16 ^{o} C, και η θερμοκρασία στα διάκενα 21,2-22 ^{o} C. Αντίστοιχα κατά την διάρκεια του μεσημεριού στο άνω μέρους του φράγματος η θερμοκρασία κυμαίνεται 35-40 ^{o} C, ενώ στα διάκενα είναι 26 ^{o} C, και στο κάτω μέρος 37-41 ^{o} C με διάκενα σε θερμοκρασία 28 ^{o} C.

Οι θερμικές ιδιότητες πετρωμάτων και νερού σε θερμοκρασία 20 ^{o} C είναι:

Ο ασβεστόλιθος έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (K) 0,48 cal/m·s·^{o}C πυκνότητα (δ) 2500 kg/cm^{3} ειδική θερμότητα (c_p) 170 cal/kg ^{o} C, και θερμική αδράνεια 450 cal/(m^{2}·s$^{1/2}$ ^{o} C). Για το νερό ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι 0,13 cal/m·s·^{o}C , πυκνότητα 1000 kg/cm^{3},1010 cal/kg ^{o} C, 370 cal/(m^{2}·s$^{1/2}$ ^{o} C).[1]

Στα φωτοσταθερά δόθηκαν συντεταγμένες με μετρήσεις στατικής μεθόδου από GPS. Το GPS είναι μονόσυχνο στην συχνότητα L1 (1575,42 MHz) και ο χρόνος καταγραφής για κάθε σημείο είναι 10 min. Από τα δύο σημεία φωτοληψίας υπολογίστηκαν οι βάσεις προς όλα τα φωτοσταθερά.

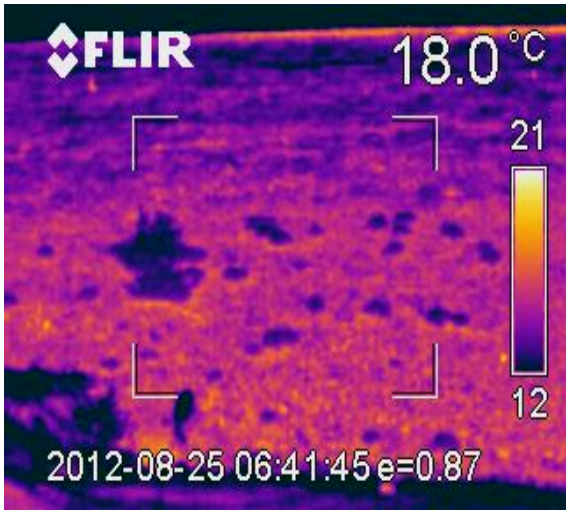
Εικόνα 14: Υπέρυθρη κάμερα στο σημείο φωτοληψίας 1

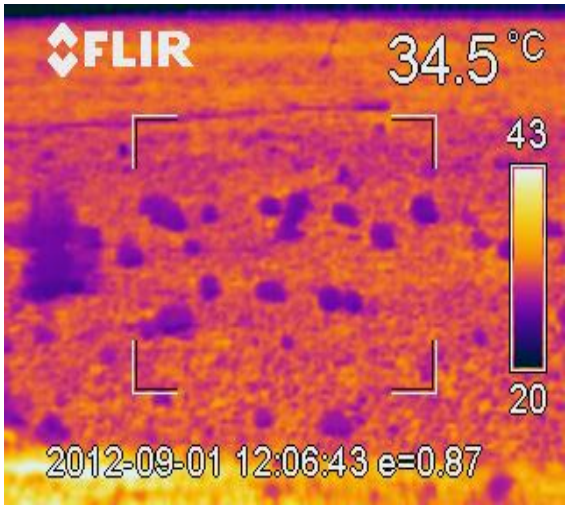


Εικόνα 15: Σταθμός GPS στο σημείο 1

Εικόνα 16: Σταθμός GPS στο μέτωπο του φράγματος

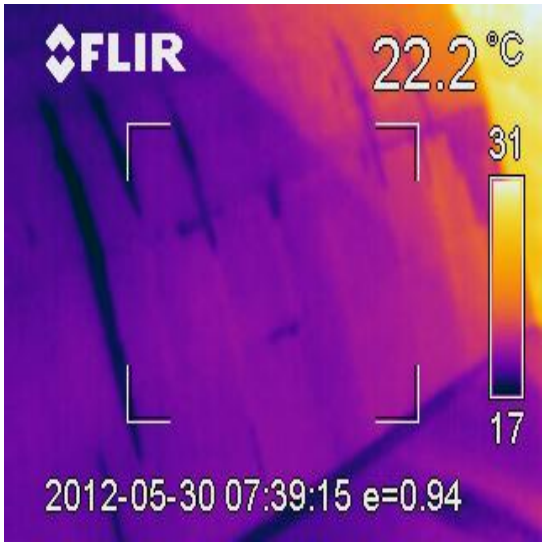
Εικόνα 17: Φωτοσταθερό στο μέτωπο





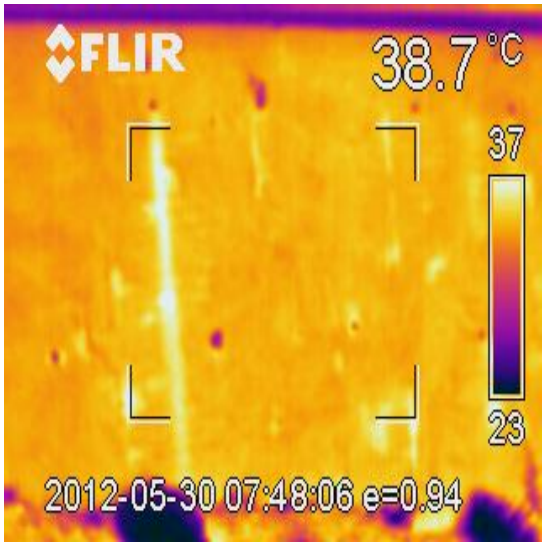
Εικόνες 18-19: Υπέρυθρες εικόνες την αυγή (αριστερά) και το μεσημέρι (δεξιά).

Οι εικόνες αυτές απεικονίζουν το ίδιο τμήμα του φράγματος σε διαφορετικές ώρες της ημέρας από το σημείο φωτοληψίας 1



Εικόνες 20-21: Υπερχειλιστής στο ορατό (αριστερά), στο υπέρυθρο (δεξιά)

Στις εικόνες αυτές παρατηρείται υγρασία στο μέτωπο του υπερχειλιστή, με θερμοκρασία 17 ^{o} C, ενώ η μέση θερμοκρασία του μπετόν είναι στους 19-20 ^{o} C. Η υγρασία διαφένεται εντονότερα στο υπέρυθρο απ'ότι στο ορατό, ενώ παρατηρείται και σε σημεία που δεν φαίνονται στο ορατό. Στον υπερχειλιστή οι υγρές περιοχές έχουν μειωμένη ανακλαστικότητα και κατά συνέπεια απεικονίζονται πιο ψυχρές.



Εικόνες 21-22: πρανές του υπερχειλιστή στο ορατό (αριστερά) και στο υπέρυθρο(δεξιά).

Στο υπέρυθρο παρατηρούνται κάποιες φωτεινές (θερμές) περιοχές με θερμοκρασία περίπου 38 ^{o} C με διαφορά 3-4° C από το υπόλοιπο πρανές όπως φαίνεται από το θερμοκρασιακό εύρος της εικόνας. Πιθανόν αυτές οι θερμές περιοχές να οφείλονται σε σκουριά από τις αγκυρώσεις στο πρανές. Όπου παρατηρούνται θερμές περιοχές, οφείλονται σε οξείδια του σιδήρου. Τα οξείδια του σιδήρου αυξάνουν την ανακλαστικότητα και τον συντελεστή εκπομπής στην περιοχή του υπέρυθρου.

4.1.2 Στατική μέθοδος GPS

Η ακρίβεια του στατικού προσδιορισμού θέσης είναι της τάξης των 5mm (+0,5-1 ppm) για δέκτες διπλών συχνοτήτων, και 5-10 mm (+1-2 ppm) για μονόσυχνα GPS. Η διάρκεια καταγραφής για μονόσυχνο GPS είναι περίπου διπλάσια για τις συνήθεις βάσεις μερικών km.

Συνήθως τα GPS, έχουν διπλάσιο σφάλμα στον κατακόρυφο άξονα απ'ότι στον οριζόντιο. Το μέγεθος των παραπάνω ακριβειών εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το μήκος των βάσεων την γεωμετρία των δορυφόρων, το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) και το χρόνο καταγραφής. Όσο υψηλότερες είναι οι τιμές SNR, τόσο καλύτερης ποιότητας είναι το σήμα.

Ο χρόνος καταγραφής των δεδομένων ποικίλλει από δεκάλεπτο έως ώρες, κάτι το οποίο καθορίζεται από το μήκος της βάσης, τον αριθμό των δορυφόρων και τον αριθμό των συχνοτήτων καταγραφής. Μεγαλύτερη βάση προϋποθέτει περισσότερο χρόνο μετρήσεων, καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καθιστούν την επίλυση δυσκολότερη. Ενδεικτικά για μονόσυχνο GPS, για βάσεις μέχρι 5 km ο χρόνος καταγραφής ανέρχεται σε 15 λεπτά, από 5 km-20 km η διάρκεια ανέρχεται σε μία ώρα περίπου, και για μεγαλύτερες βάσεις (που δεν συνηθίζεται) απαιτούνται μερικές ώρες. Ο ρυθμός καταγραφής είναι 10-15 sec για τις συνήθεις εφαρμογές και 30 sec για τις πολύωρες.

Στην μέθοδο αυτή, δύο ή περισσότεροι δέκτες εναλλάσσονται σε διάφορα σημεία, και επιλέγουμε όλες τις δυνατές βάσεις μεταξύ των σημείων- ανεξάρτητες μεταξύ τους- μέχρις

ότου συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός βάσεων για τον προσδιορισμό της θέσης όλων των σημείων. Η περίπτωση που ένα σημείο έχει μετρηθεί μόνο από μια βάση, μια φορά θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς δεν υπάρχει πλεόνασμα πληροφορίας, και τυχόν λάθος δεν μπορεί να ελεχθεί. Ένας ή περισσότεροι δέκτες παραμένουν για κάποια διαστήματα στα ίδια σημεία και οι υπόλοιποι μετακινούνται σχετικά ανάλογα με το σχεδιασμό της μέτρησης. Σε περισσότερους από δύο δέκτες θα πρέπει τουλάχιστον ένα σημείο να είναι κοινό, και κατά προτίμηση δύο για αύξηση και έλεγχο της ακρίβειας και της αξιοπιστίας.

Είναι σημαντική η ένταξη του δικτύου GPS στο κρατικό σύστημα αναφοράς. Για την διαδικασία αυτή απαιτείται μετασχηματισμός των συντεταγμένων GPS που αναφέρονται στο WGS84 ή σε ένα ITRF και απαιτεί ικανό αριθμό σημείων. Σε κάθε μέτρηση θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο σημεία ή ακόμη καλύτερα τρια για έλεγχο ως προς ένα τοπικό σύστημα αναφοράς το ΕΓΣΑ 87. Παραλλαγές της στατικής μεθόδου είναι ο ψευδοκινηματικός προσδιορισμός, γρήγορος στατικός προσδιορισμός ή στατικός προσδιορισμός με επαναμέτρηση. Για να μπορέσουν να προσδιοριστούν οι παράμετροι μετασχηματισμού, απαιτούνται κάποια κοινά σημεία με γνωστές συντεταγμένες και στα δύο συστήματα (X,Y,Z) ως προς WGS84 και (X,Y,Z) ως προς ΕΓΣΑ 87. Ως προς το τοπικό σύστημα οι συντεταγμένες υπολογίζονται από τις προβολικές συντεταγμένες (χ,y) ή από τις αντίστοιχες γεωδαιτικές (φ,λ), με γνώση του ορθομετρικού υψομέτρου (H) και του αντίστοιχου υψομέτρου του γεωειδούς (N). Το γεωμετρικό υψόμετρο (h) υπολογίζεται από τον τύπο h=N+H. Με αυτό το μετασχηματισμό τα (φ,λ,h) μετατρέπονται σε (X,Y,Z) ως προς το ΕΓΣΑ 87.

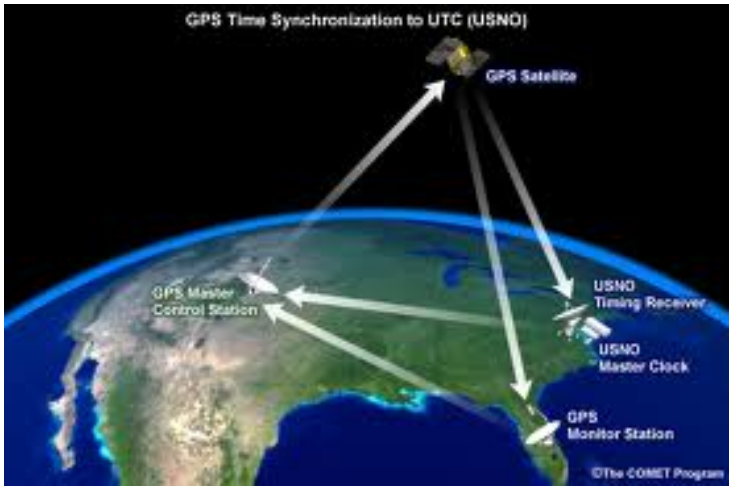
4.1.2.1 Σφάλματα και πηγές σφαλμάτων GPS

Υφίσταται μια σειρά σφαλμάτων, που επηρεάζουν τον προσδιορισμό θέσης με παρατηρήσεις GPS. Τα τυχαία αυτά σφάλματα τα οποία είναι αναπόφευκτα, χαρακτηρίζονται ως θόρυβος.

Χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες:

Σφάλματα που σχετίζονται με δορυφόρους: το σφάλμα της δορυφορικής εφημερίδας (τροχιάς), η γεωμετρική διάταξη του δορυφορικού σχηματισμού, το σφάλμα ρολογιού του δορυφόρου, και το σφάλμα της επιλεκτικής διαθεσιμότητας.

Η ακρίβεια των δορυφορικών τροχιών εξαρτάται από τον αριθμό των σταθμών παρακολούθησης του GPS, τους αλγόριθμους για τα τροχιακά μοντέλα και από τον γεωμετρικό σχηματισμό των δορυφόρων κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων. Ένα ακόμη είδος σφάλματος που υπεισέρχεται στις παρατηρήσεις είναι ο συχρονισμός του δορυφορικού χρόνου (t), με τον χρόνο αναφοράς των GPS (τ). Ο χρόνος αναφοράς των GPS (τ) είναι σε σχέση με τον παγκόσμιο χρόνο UTC. Οι διαφορές μεταξύ δορυφορικού χρόνου (t) και (τ) είναι της τάξης των 35 nsec και δημοσιεύονται από την UNSO (US Naval Observatory).



Εικόνα 23: Συχρονισμός δορυφορικού χρόνου με χρόνο αναφοράς GPS.

Η γεωμετρική διάταξη των δορυφόρων-δέκτη επηρεάζει τον προσδιορισμό θέσης. Αυτή η αβεβαιότητα χαρακτηρίζεται από ένα καθαρό αριθμό, που ονομάζεται **GDOP**,ο οποίος σε περίπτωση που έχει τιμή μεγαλύτερη από 6, η γεωμετρία του συστήματος δεν θεωρείται αξιόπιστη για τον εντοπισμό της θέσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε μικρό αριθμό δορυφόρων ή σε δορυφόρους που πλησιάζουν προς ένα επίπεδο στο χώρο.

Σφάλματα που σχετίζονται με τους δέκτες: το σφάλμα του ρολογιού του δέκτη το τυχαίο σφάλμα παρατήρησης, το σφάλμα εξαιτίας της αβεβαιότητας του γνωστού σημείου κατά την επίλυση βάσης,

Στην κατηγορία αυτή αναφέρονται και τα ενδογενή σφάλματα του δέκτη όπως, σφάλματα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, θερμοκρασία των κυκλωμάτων, ισχύς του λαμβανόμενου σήματος και το εύρος της φασματικής ζώνης.

Και τέλος,

Σφάλματα που σχετίζονται με την διάδοση του σήματος: τα ατμοσφαιρικά σφάλματα, το σφάλμα της ολίσθησης των κύκλων, πολυκλαδικές παρεμβολές. Ατμοσφαιρικές επιδράσεις

Τα μικροκύματα του GPS διαθλώνται από την τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα, με αποτέλεσμα το σήμα να φτάνει στο δέκτη αργότερα σε σχέση με ένα σήμα που θα διαδίδονταν στο κενό χώρο.

Επιδράσεις λόγω ιονόσφαιρας

Τα ιονισμένα αέρια της ατμόσφαιρας προκαλούν χρονική καθυστέρηση στην διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ο ιονισμός αυτός έχει προκληθεί από την απελευθέρωση ηλεκτρονίων των αερίων της ατμόσφαιρας εξαιτίας της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τον Ήλιο. Οι ιονοσφαιρικές επιδράσεις εξαρτώνται από την δομή της ιονόσφαιρας κατά την κατακόρυφο από το σημείο παρατήρησης. Η δομή αυτή επηρεάζεται από εποχικές μεταβολές, γεωγραφικό πλάτος (φ) του τόπου, ημερήσια μεταβολή και μεταβολές ηλιακού κύκλου.

Ακόμα, ένας παράγοντας που επιδρά στις ιονοσφαιρικές καθυστερήσεις είναι η γωνία ύψους του δορυφόρου από την ατμόσφαιρα. Η ιονοσφαιρική καθυστέρηση στη διάρκεια της ημέρας είναι στα 15 m , ενώ κατά την διάρκεια της νύχτας στα 3 m .Για μικρές γωνίες δορυφόρου η καθυστέρηση ανέρχεται στα 9 m την νύχτα και 45 m την ημέρα. Οι καθυστερήσεις του σήματος λόγω ιονόσφαιρας, διορθώνονται είτε μέσω του μηνύματος ναυσιπλοΐας ,είτε με μετρήσεις στις συχνότητες L1 και L2. Το μήνυμα ναυσιλοΐας ενημερώνεται συνεχώς από τους δορυφόρους, και μετά από την διόρθωση παραμένει

σφάλμα της τάξεως των 1-2 m. Με δέκτες διπλών συχνοτήτων, για τον προσδιορισμό του σφάλματος μετρείται η διαφορά των αποστάσεων μεταξύ L1 και L2 δίνοντας ακρίβεια της τάξης των 1-2 m.

Επιδράσεις τροπόσφαιρας

Οι επιδράσεις της τροπόσφαιρας προσδιορίζονται συνήθως με μαθηματικά μοντέλα που περιλαμβάνουν συνιστώσες της ατμόσφαιρας (θερμοκρασία,πίεση,υγρασία). Συχνότητες του φέροντος κύματος μικρότερες των 30 GHz δεν επιδρούν στις τροποσφαιρικές καθυστερήσεις. Με την εφαρμογή ενός απλού μοντέλου για διορθώσεις στην τροπόσφαιρα επιτυγχάνονται ακρίβειες της τάξης κάτω του 1 m.

Πολυκλαδικές παρεμβολές- σφάλμα πολυανάκλασης

Είναι το φαινόμενο όπου το δορυφορικό σήμα φτάνει στο δέκτη και από άλλες διαδρομές εκτός από την κανονική του πορεία, από ανακλάσεις σημάτων σε γειτονικά αντικείμενα. Επειδή το σήμα ‘’ διαγράφει’’ μεγαλύτερη διαδρομή από την κανονική, επηρεάζει τις παρατηρήσεις από τον δέκτη. Αυτές οι παρεμβολές μπορούν να συμβούν στην κεραία του δέκτη, καθώς και στην κεραία του δορυφόρου. Το σφάλμα λόγω πολυανάκλασης για τον δορυφόρο δεν λαμβάνεται υπόψη συνήθως. Οι παρεμβολές αυτές εξαρτώνται από το ύψος του δορυφόρου, την κατάσταση της κεραίας του δέκτη και της γεωμετρίας του περιβάλλοντος χώρου.

Τα σφάλματα πολυανάκλασης μειώνονται εάν χρησιμοποιήσουμε φίλτρα στο δέκτη, που θα απορρίπτουν σήματα, των οποίων το μήκος του παλμού είναι μεγαλύτερο από του δέκτη.

Η εκτίμηση αυτών των σφαλμάτων πριν την συνόρθωση δεν μπορεί να προσδιοριστεί με την ακρίβεια που απαιτείται, όμως η μοντελοποίηση τους χαρακτηρίζεται ικανοποιητική, παρόλο που αυξάνει τις άγνωστες παραμέτρους στα μοντέλα συνόρθωσης.

Εικόνα 24: Τυπικά σφάλματα που επηρεάζουν τις μετρήσεις GPS

4.1.3 Θερμική διαστρωμάτωση των λιμνών

Στις βαθιές λίμνες ο βυθός παραμένει σκοτεινός, όπως και στη θάλασσα. Η επιφανειακή ζώνη της λίμνης που φτάνει το φως λέγεται **ευφωτική,** ενώ η ζώνη στην οποία δε φτάνει το φως λέγεται **αφωτική**. Η παρουσία ή η απουσία του φωτός επηρεάζει και τη θερμοκρασία του νερού, με αποτέλεσμα το νερό στην επιφάνεια να είναι πιο θερμό και αραιό, ενώ σε μεγαλύτερα βάθη πιο ψυχρό και πυκνό. Το τμήμα στο οποίο δεν φτάνει το φως και χαρακτηρίζεται από ψυχρό και πυκνό νερό ονομάζεται **υπολίμνιο,** ενώ το επιφανειακό τμήμα ονομάζεται **επιλίμνιο**. Το υπολίμνιο χαρακτηρίζεται συνήθως από χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Λόγω διαστολής και μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού, κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους, η θερμοκρασία στο υπολίμνιο παραμένει σταθερή και υψηλότερη από αυτή του επιλίμνιου. Το επιλίμνιο είναι το επιφανειακό νερό που δέχεται άμεσα τις επιδράσεις από τις μεταβολές της

θερμοκρασίας του αέρα και τον άνεμο και περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου.

Μεταξύ των δύο αυτών στρωμάτων δημιουργείται ένα περιορισμένο στρώμα, όπου αναμειγνύεται το θερμό νερό του επιλίμνιου με το ψυχρότερο του υπολίμνιου, που ονομάζεται μεταλύμνιο ή θερμοκλινές. Η στρωμάτωση αυτή, είναι πιο έντονη το καλοκαίρι και εξαφανίζεται το φθινόπωρο με την πτώση της θερμοκρασίας.

Η αλλαγή της πυκνότητας του νερού στο μεταλίμνιο λειτουργεί σαν ένας φυσικός φραγμός που εμποδίζει την ανάμειξη του νερού των ανώτερων και των βαθύτερων στρωμάτων για αρκετούς μήνες κι εμποδίζει τη μεταφορά του διαλυμένου οξυγόνου και των θρεπτικών συστατικών από το επιλίμνιο στο υπολίμνιο.

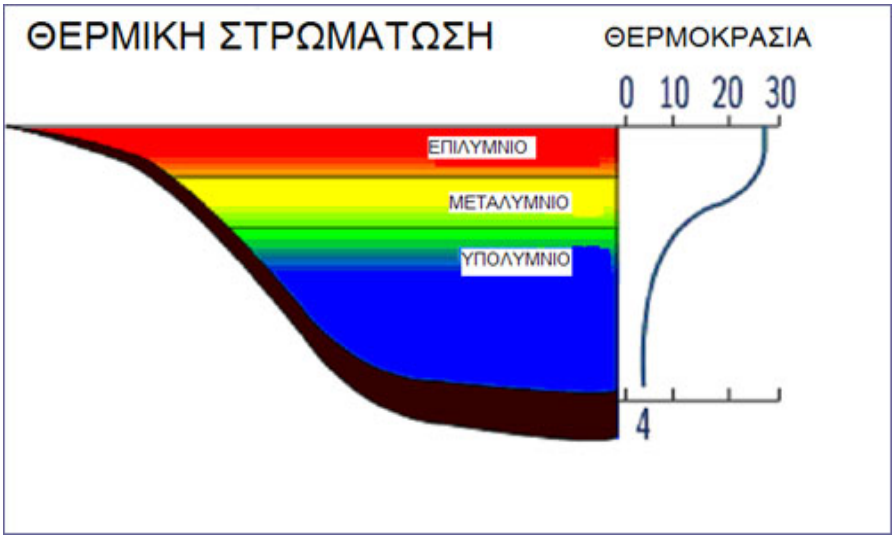
Σύμφωνα με αυτό τον φυσικό μηχανισμό, αναμένεται η αντίστοιχη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση και στην λεκάνη του φράγματος. Η επιφανειακή θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε με την υπέρυθρη κάμερα στους 20° C κατά την αυγή, ενώ αναμένεται το κατώτερο στρώμα στο υπόβαθρο του ταμιευτήρα να έχει αισθητά χαμηλότερη θερμοκρασία περίπου στους 15° C. Αντίστοιχα τις μεσημεριανές ώρες η επιφανειακή θερμοκρασία ήταν στους 26° C, με το κατώτερο στρώμα να παραμένει στην ίδια θερμοκρασία για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.1.4 Θερμική συμπεριφορά υδάτινων μαζών

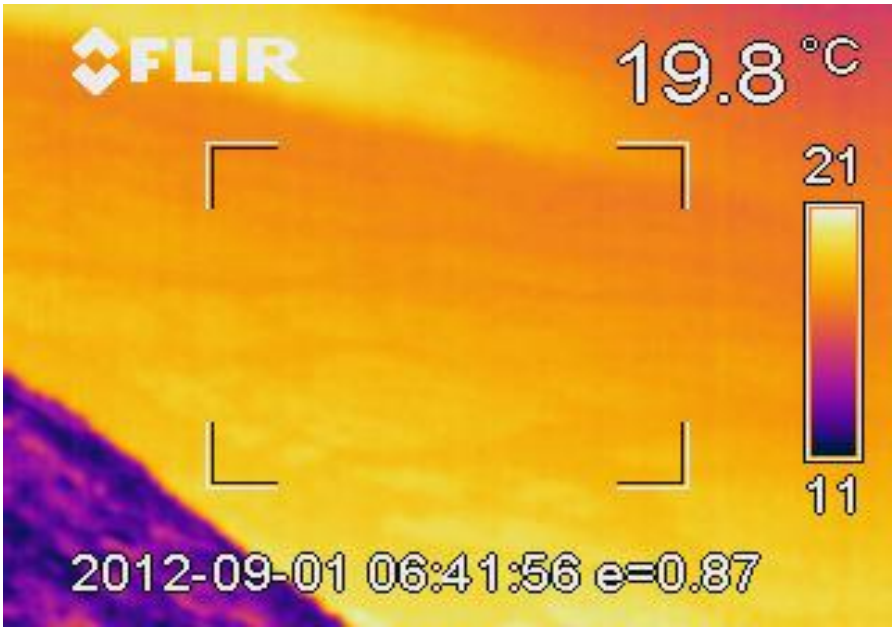
Η μετάδοση της θερμικής ενέργειας στα στερεά γίνεται κυρίως δια αγωγής, αντίθετα με το νερό όπου η θερμική ενέργεια μεταδίδεται με μεταφορά υγρής μάζας νερού. Σε αυτό το φαινόμενο οφείλεται το γεγονός ότι παρόλο που το νερό έχει παρόμοια θερμική αδράνεια (370 $cal/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot °C$), με τον οψιδιανό (350 $cal/m^2 \cdot s^{1/2} \cdot °C$), για παράδειγμα, η αντίδρασή του είναι διαφορετική. Στα στερεά, η θερμική ενέργεια τείνει να συγκεντρωθεί κοντά στις επιφάνειες τους, με μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος κατά τη διάρκεια του 24ώρου, (υψηλή θερμοκρασία την ημέρα-χαμηλή θερμοκρασία τη νύχτα).

Ενώ, το νερό εμφανίζεται ψυχρότερο από τα περιβάλλοντα πετρώματα κατά την διάρκεια της ημέρας και θερμότερο τη νύχτα, (μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές ΔΤ κατά

το 24ωρο). Το φαινόμενο της ανάμειξης θερμών και ψυχρών μαζών προκαλεί μια ομοιόμορφη θερμοκρασία στην επιφάνεια του νερού κατά την ημέρα και τη νύχτα. **Λόγω του τρόπου μετάδοσης της θερμότητας από τον Ήλιο στο νερό**, οι υδάτινες μάζες συμπεριφέρονται ως σώματα με υψηλή θερμική αδράνεια.



Εικόνα 25: θερμική διαστρωμάτωση λίμνης πηγή (kpe-kastor.kas.sch.gr)



Εικόνα 26: Επιφανειακή θερμοκρασία νερού την αυγή.

4.1.4 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Ψηφιακή εικόνα είναι η μεταφορά μιας εικόνας από τον αναλογικό στον ψηφιακό κόσμο μέσω διακεκριμένου σήματος με την μορφή πινάκων. Η ψηφιακή εικόνα μπορεί να είναι **δυαδική** (binary image), **μονοχρωματική** αποχρώσεων του γκρι (gray-level ή gray-scale image) ή **έγχρωμη** (color image). Για παράδειγμα, μια ψηφιακή εικόνα αποχρώσεων του γκρι διαστάσεων N x M παριστάνεται από ένα δισδιάστατο πίνακα ακέραιων αριθμών I(i,j), i=1,…..,N και j=1,…..,M όπου 0≤ I(i,j)≥G-1. Το G ισούται συνήθως με μια δύναμη του 2, δηλαδή $G=2^m$ με το m=8 να είναι η πιο συνήθη τιμή που αντιστοιχεί σε 256 αποχρώσεις του γκρι. Για την ευκολότερη επεξεργασία των εικόνων προτιμάται όχι μόνο το G αλλά και οι διαστάσεις των εικόνων να είναι δυνάμεις του δυο. Η τιμή I(i,j), εκφράζει την ένταση της φωτεινότητας της εικόνας στο εικονοστοιχείο (pixel), (η λέξη pixel προέρχεται από τον όρο ‘’picture element’’). Κάθε εικονοστοιχείο σε μια ασπρόμαυρη εικόνα έχει μια απόχρωση του γκρι (τιμή) εύρους από 0 έως 255. Το 0 αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα και το 255 στο λευκό όπου οι ενδιάμεσες τιμές είναι αποχρώσεις του γκρι.[2]

Ο όρος **επεξεργασία εικόνας** (image processing) αναφέρεται στους τρόπους με τους οποίους λαμβάνονται πληροφορίες από μια ψηφιακή εικόνα. Οι πληροφορίες αυτές δεν θα ήταν δυνατόν να αποδωθούν από γυμνού οφθαλμού, καθώς το πλήθος και το είδος των πληροφοριών μιας ψηφιακής εικόνας είναι τεράστιο και εξαρτάται από τις ιδιότητες της ανιχνευτικής συσκευής.

Οι έγχρωμες ψηφιακές εικόνες μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρεις επιμέρους εικόνες κάθε μια αντιστοιχεί σε μια φασματική συνιστώσα. Στο χρωματικό σύστημα RGB (red green blue) το κάθε χρώμα συντίθεται από το κόκκινο (Red), το πράσινο (Green) και μπλε (Blue). Όταν αυτά τα χρώματα αναμειχθούν σε διάφορες αναλογίες παράγουν όλα τα γνωστά χρώματα του ορατού φάσματος. Για κάθε χρωματική συνιστώσα έχουμε G=256 δηλαδή κάθε εικόνα μπορεί να αντιστοιχηθεί σε εικόνα γκρι 256 αποχρώσεων.

Για την ποιότητα της εικόνας, ο παράγοντας που κρίνεται σημαντικός είναι η διαχωριστική ικανότητα, η ικανότητα ενός συστήματος να διακρίνει αντικείμενα. Η διαχωριστική ικανότητα χωρίζεται σε φασματική, ραδιομετρική, χωρική και διαχρονική.

Η **φασματική ανάλυση** ή φασματική διαχωριστική ικανότητα καθορίζει την δυνατότητα του συστήματος να διαχωρίζει μεμονωμένους στόχους, όπως το είδος του πετρώματος ή βλάστησης. Η φασματική διαχωριστική ικανότητα επηρεάζεται από το πλάτος και τον αριθμό των φασματικών ζωνών. Περισσότερες φασματικές ζώνες αυξάνουν την ικανότητα του συστήματος να διακρίνει στόχους. Η **χωρική ανάλυση** είναι η ικανότητα ενός συστήματος να ξεχωρίζει τα αντικείμενα στη γεωμετρική τους διάσταση. Η **ραδιομετρική ανάλυση** ή ραδιομετρική διαχωριστική ικανότητα καθορίζει τον αριθμό των διαβαθμίσεων που χρησιμοποιούνται για την ψηφιοποίηση της έντασης της ακτινοβολίας.

Αριθμός BITS μιας εικόνας

Μια εικόνα με διαστάσεις K x L και πλήθος αποχρώσεων $G=2^m$ απαιτεί z= K x L x m bits για να αποθηκευτεί. Το m ονομάζεται βάθος bit (bit depth) και είναι συνάρτηση της χρωματικής πληροφορίας που απαιτείται για την εμφάνιση ή την εκτύπωση μιας εικόνας. Μεγαλύτερο βάθος συνεπάγεται μεγαλύτερη ακρίβεια και περισσότερες διαθέσιμες αποχρώσεις.

Ευκρίνεια εικόνας

Η ευκρίνεια μιας εικόνας ισούται με το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά μονάδα επιφάνειας και μετριέται σε pixels/in^2 ή σε dpi (dots per inch). Σχετίζεται με το πόσο μπορούμε να διακρίνουμε τις λεπτομέρειες μιας εικόνας. Εξαρτάται από το πλήθος των αποχρώσεων της κάθε εικόνας (m), όσο και από τις διαστάσεις.

4.1.4.1 Γεωμετρική διόρθωση

Συχνά απαιτείται οι πληροφορίες της εικόνας να ενταχθούν σε ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών. Η μετατροπή της εικόνας ώστε να έχει τις γεωμετρικές ιδιότητες της χαρτογραφικής προβολής, ονομάζεται γεωμετρική διόρθωση της εικόνας. Η γεωμετρική διόρθωση απαιτεί (1) τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στο σύστημα αναφοράς των συντεταγμένων στην εικόνα και στο χαρτογραφικό σύστημα. (2) Τον ορισμό ενός συνόλου σημείων στην συνορθωμένη εικόνα, τα οποία θα αποτελέσουν το νέο κάνναβο της χαρτογραφικής προβολής. (3) Και τέλος, τον επαναπροσδιορισμό των νέων τιμών του γκρι από τις αρχικές τιμές της αδιόρθωτης εικόνας, στις νέες θέσεις των εικονοστοιχείων. [1]

τύποι γεωμετρικών διορθώσεων:

Γεωμετρική ανόρθωση ή γεωαναφορά

Έχει σαν στόχο τα στοιχεία της εικόνας να συνδέονται με χαρτογραφικές συντεταγμένες. Αυτό επιτυγχάνεται, με μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων της εικόνας, σε ένα συγκεκριμένο σύστημα χαρτογραφικής προβολής , με σημεία ελέγχου στο έδαφος. Κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από τις συντεταγμένες στο σύστημα του χάρτη και από τις συντεταγμένες της εικόνας. Αυτή όμως η συνόρθωση, δεν εξαλείφει τα σφάλματα από την τοπογραφία και το ανάγλυφο.

Η συνόρθωση λόγω υψομέτρου αναγλύφου και η γεωμετρική ανόρθωση, επιτυγχάνεται με την **ορθοκανονικοποίηση**. Οι συντεταγμένες των σημείων είναι σε τρείς διαστάσεις (χ,y,z), ενώ απαιτούνται πληροφορίες για την κάμερα και ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο εδάφους (EDM).

Γεωμετρική εγγραφή ή συνόρθωση

Στοχεύει σε μετασχηματισμό του συστήματος συντεταγμένων μιας εικόνας σε σύστημα συντεταγμένων εικόνας αναφοράς –η οποία μπορεί να είναι γεωμετρικά ανορθωμένη ή μη- απεικονίζει όμως την ίδια περιοχή. Στην ουσία δεν στοχεύει στη διόρθωση των σφαλμάτων της εικόνας, αλλά στο μετασχηματισμό της ώστε να είναι συγκρίσιμη με άλλη εικόνα.

Στόχος της γεωμετρικής διόρθωσης μιας εικόνας είναι να μετασχηματιστεί το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας σε σύστημα χαρτογραφικής προβολής. Αρκετές εφαρμογές μετασχηματισμών έχουμε στην φωτογραμμετρία και στην τηλεπισκόπηση για διορθώσεις από συστηματικά σφάλματα.

4.1.4.2 Αφινικός μετασχηματισμός

Ο αφινικός μετασχηματισμός ορίζεται πλήρως με τον προσδιορισμό 6 συντελεστών που εκφράζουν τις εξής παραμέτρους: δύο συντελεστές μεταθέσεως t_x, και t_y κατά χ και y αντίστοιχα και δύο γωνίες στροφής θ_χ και θ_y κατά χ και y, και δύο συντελεστές κλίμακας λ_χ και λ_y κατά χ και y αντίστοιχα. Ο ελάχιστος αριθμός κοινών σημείων που απαιτούνται ώστε να υπάρχει έλεγχος της ακρίβειας των σημείων είναι τέσσερα.

Η σχέση που συνδέει τα δύο συστήματα xy και x'y':

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \varepsilon & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_\chi & 0 \\ 0 & \lambda y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Όπου θ η στροφή και ε η απόκλιση από την ορθογωνικότητα. Προκειμένου να υπολογιστούν οι 6 αυτοί συντελεστές απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία γνωστά, κοινά και στα δύο συστήματα. Στην περίπτωση όπου ο αριθμός των γνωστών σημείων είναι μεγαλύτερος εφαρμόζεται επίλυση με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο αφινικός μετασχηματισμός επιτρέπει να μετασχηματίζονται στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων οι συντεταγμένες εικονοσημείων που έχουν μετρηθεί σε διαφορετικό σύστημα. Ο αφινικός μετασχηματισμός δεν διατηρεί τα σχήματα, αλλά μόνο τις παραλληλίες μεταξύ των ευθειών, για παράδειγμα ένα ορθογώνιο μετασχηματίζεται σε παραλληλόγραμμο. Οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τον αφινικό μετασχηματισμό είναι:

$$x = a_1 x' + b_1 y' + c1 \tag{4.2}$$

$$y = a_2 x' + b_2 y' + c2 \tag{4.3}$$

Όπου:

$$a_1 = \mu_x \cos\theta_x \tag{4.4}$$

$$b_1 = \mu_y \sin\theta_y \tag{4.5}$$

$$a_2 = -\mu_x \sin\theta_x \tag{4.6}$$

$$b_2 = \mu_y \cos\theta_y \tag{4.7}$$

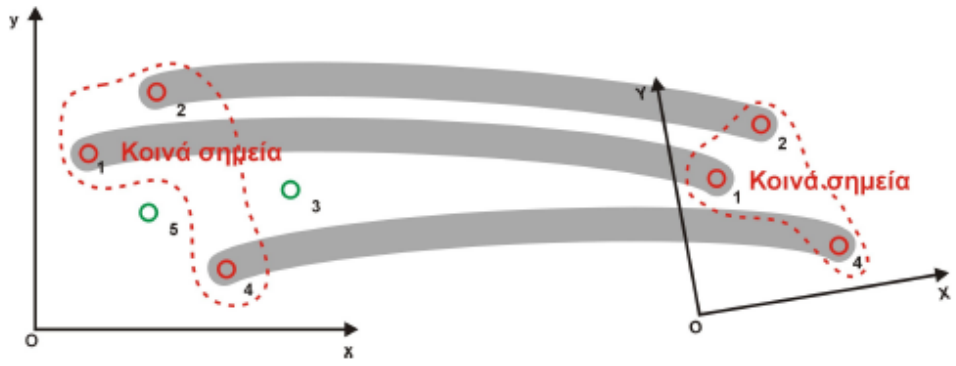
x_i, y_i οι συντεταγμένες των σημείων στο αρχικό σύστημα αναφοράς και,

X_i, Y_i οι συντεταγμένες στο τελικό σύστημα αναφοράς

Υπολογισμός παραμέτρων μετασχηματισμού με τα ελάχιστα τετράγωνα

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων ενός μετασχηματισμού στο επίπεδο προϋποθέτει την γνώση των συντεταγμένων ενός αριθμού σημείων κοινών και στα δύο συστήματα αναφοράς. Ο ελάχιστος αριθμός των κοινών σημείων που απαιτούνται, εξαρτάται από τον αριθμό των παραμέτρων του κάθε μετασχηματισμού.

Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερα γνωστά σημεία από τα ελάχιστα, οι παράμετροι μετασχηματισμού του αφινικού δεν υπολογίζονται απευθείας με λύση του συστήματος των εξισώσεων τους αλλά από τους τύπους που προκύπτουν με την εφαρμογή του κριτηρίου των ελαχίστων τετραγώνων. Ο αριθμός των αγνώστων για το παραπάνω πολυώνυμο είναι έξι. Για μια και μοναδική λύση απαιτούνται τρία σημεία γνωστών συντεταγμένων. Στις εικόνες τα σημεία που διακρίνονται ευκρινώς είναι τέσσερα.[3]



Εικόνα 27: Υπολογισμός των παραμέτρων του μετασχηματισμού, από τα κοινά σημεία στα δύο συστήματα αναφοράς (Κατσουγιαννόπουλος,2008)

Με την προϋπόθεση ότι οι παρατηρήσεις των συντεταγμένων είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους και της ίδιας ακρίβειας καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού των παραμέτρων του μετασχηματισμού:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2 \sum_{i=1}^{n} u_i X_i - \sum_{i=1}^{n} u_i v_i \sum_{i=1}^{n} v_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} u_i v_i)^2}, \qquad a_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2 \sum_{i=1}^{n} u_i Y_i - \sum_{i=1}^{n} u_i v_i \sum_{i=1}^{n} v_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} u_i v_i)^2} \qquad (4.8)\ (4.9)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i X_i - \sum_{i=1}^{n} u_i v_i \sum_{i=1}^{n} u_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} u_i v_i)^2}, \qquad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i Y_i - \sum_{i=1}^{n} u_i v_i \sum_{i=1}^{n} u_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i^2 \sum_{i=1}^{n} v_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} u_i v_i)^2} \qquad (4.10)(4.11)$$

$$t_x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \ , \ t_y = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i \qquad (4.12)$$

Όπου u_i,v_i είναι οι αναχθείσες συντεταγμένες των x_i,y_i αντίστοιχα στο κέντρο βάρους των n κοινών σημείων.

$$u_i = x_i - \overline{x} \ , \ \overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad v_i = y_i - \overline{y} \ , \ \overline{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \qquad (4.13)\ (4.14)$$

Για τα υπόλοιπα σημεία οι σχέσεις του μετασχηματισμού γίνονται:

$$\begin{aligned} X &= a_1 u_i + b_1 v_i + t_x \\ Y &= a_2 u_i + b_2 v_i + t_y \end{aligned} \qquad \textbf{(4.15)}$$

Το επόμενο βήμα για την τελική διορθωμένη εικόνα είναι να επαναπροσδιορισθούν οι νέες τιμές διαβάθμισης του επιπέδου του γκρι ώστε οι ακριβείς θέσεις να αντιστοιχούν στα κέντρα του νέου καννάβου της διορθωμένης εικόνας. Για να ορισθούν οι νέες τιμές στα νέα κέντρα των ψηφίδων, θα πρέπει να επαναληφθεί η δειγματοληψία στα νέα κέντρα των ψηφίδων. Μια τεχνική είναι και η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.

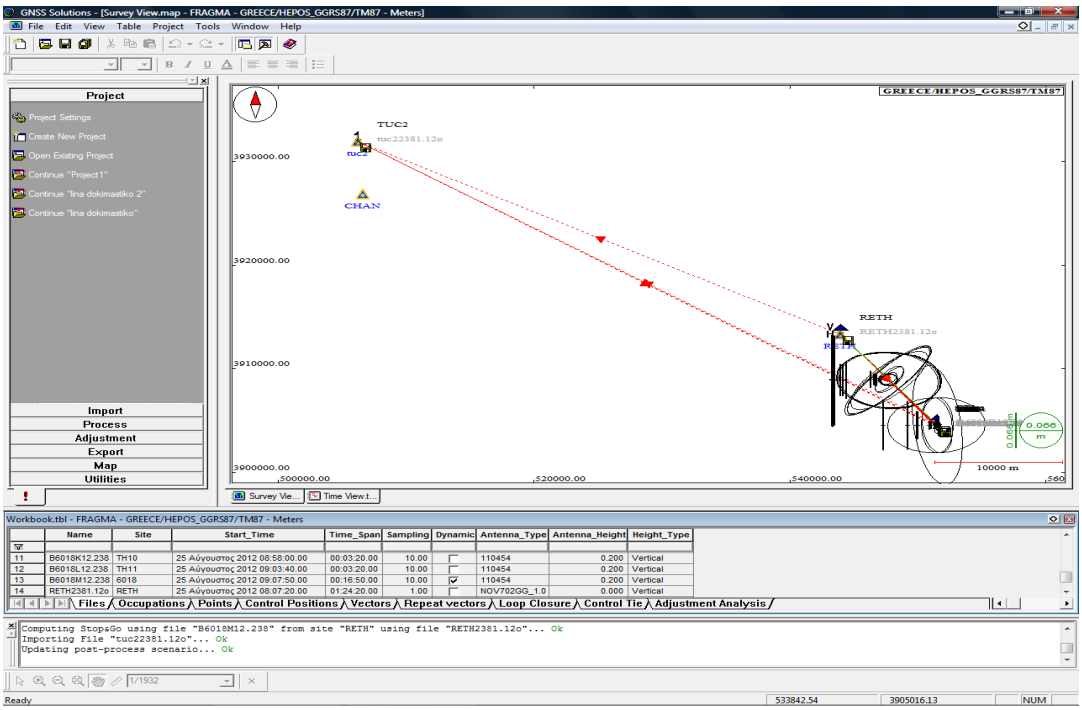
Η μέθοδος του πλησιέστερου γειτονικού σημείου

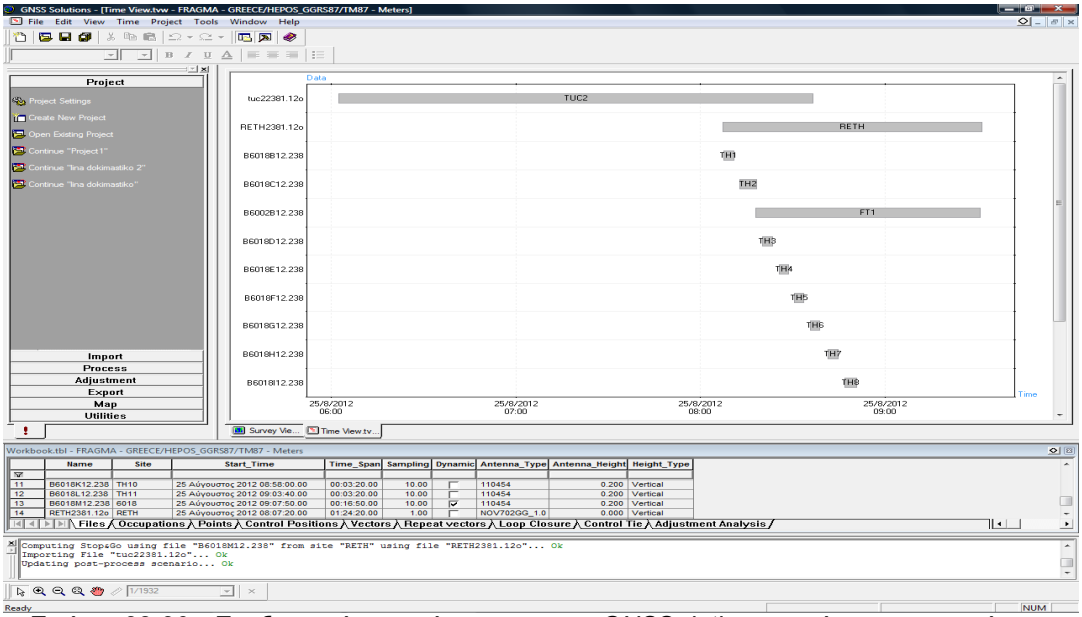
Στην μέθοδο αυτή, αντικαθίσταται η τιμή DN (του επιπέδου διαβάθμισης του γκρι) του ζητούμενου εικονοστοιχείου με την τιμή DN του πλησιέστερου εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας. Με αυτή τη μέθοδο, οι προκύπτουσες τιμές DN παραμένουν ίδιες με της αρχικής εικόνας. Μερικές φορές, επειδή οι ψηφιακές τιμές επαναλαμβάνονται, παρατηρείται η συγκέντρωση του επιπέδου του γκρι DN των ψηφίδων σε ορισμένες περιοχές της εικόνας. Όμως, με αυτή την τεχνική δεν δημιουργείται καινούργια εξομαλυσμένη εικόνα.

4.2 Επεξεργασία των μετρήσεων – Αποτελέσματα

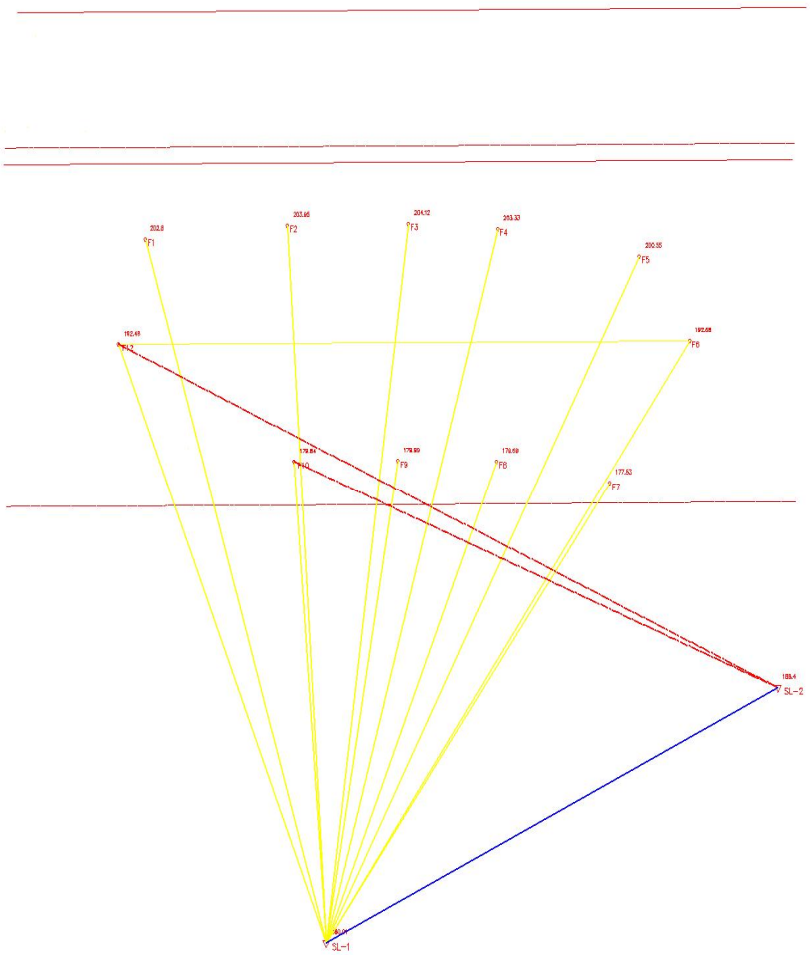
Η συνόρθωση των σημείων έγινε με το λογισμικό της ACHSTECH το GNSSolutions. Το λογισμικό αυτό έδωσε τα διανύσματα μεταξύ των σημείων (αζιμούθιο) καθώς και την απόστασή τους. Για την μετασχηματισμό των συντεταγμένων GPS ως προς ένα γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (ΕΓΣΑ 87) λήφθηκαν μέσω internet αρχεία ταυτόχρονων παρατηρήσεων από το σταθμό **RETH** της JGC και το **TUC 2** του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο TUC 2 ανήκει στο πανευρωπαϊκό δίκτυο μόνιμων παρατηρήσεων GPS της υπηρεσίας EUREF (European Reference Frame Permanent Network). Η προβολή ΤΜ'87 χρησιμοποιείται παράλληλα με το νέο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ'87) και το ελλειψοειδές εκ περιστροφής GRS'80, με κεντρικό μεσημβρινό $\lambda=24^o$ και άξονα τετμημένων τον ισημερινό. Το μέτρο της γραμμικής παραμόρφωσης είναι $m_o=0.9996$ και η σταθερή ποσότητα c=500000. Η προβολή ΤΜ'87 είναι το προβολικό σύστημα που χρησιμοποιείται από τον ΟΚΧΕ για την δημιουργία του Εθνικού Κτηματολογίου.

Από τα αρχεία αυτά έγινε η επίλυση ως προς σημείο 1 (control point), σε κρατικές συντεταγμένες και στη συνέχεια ως προς κάθε φωτοσταθερό στο μέτωπο. Στα αποτελέσματα αυτά εμφανίζεται η κατακόρυφη μπάρα σφάλματος, και οι ασάφειεες σημείων και διανυσμάτων στο χ,y παρουσιάζονται με ελλείψεις. Αν στο διάνυσμα έχουν προσδιοριστεί όλες οι ασάφειες **(fixed)** έχει περάσει το Q_A test τότε απεικονίζεται με πράσινο. **QA test** είναι το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων των επιλύσεων από διαφορετικούς δορυφόρους. Με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή αν έχει προσδιοριστεί πάνω από το 50%, διάνυσμα **partial**, και με κόκκινη γραμμή διάνυσμα **float** αν έχουν προσδιοριστεί λιγότερο από 50%. Στα αποτελέσματα του προγράμματος, τα διανύσματα μεταξύ του TUC2 του Reth και του σημείου ελέγχου (control point) εμφανίζονται ως float, καθώς βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση άνω των 60 km και οι μετρήσεις έγιναν με μονόσυχνο GPS.





Εικόνα 28-29: Επεξεργασία μετρήσεων με το GNSSolutions, χρόνοι παρατηρήσεων κάθε σταθμού.



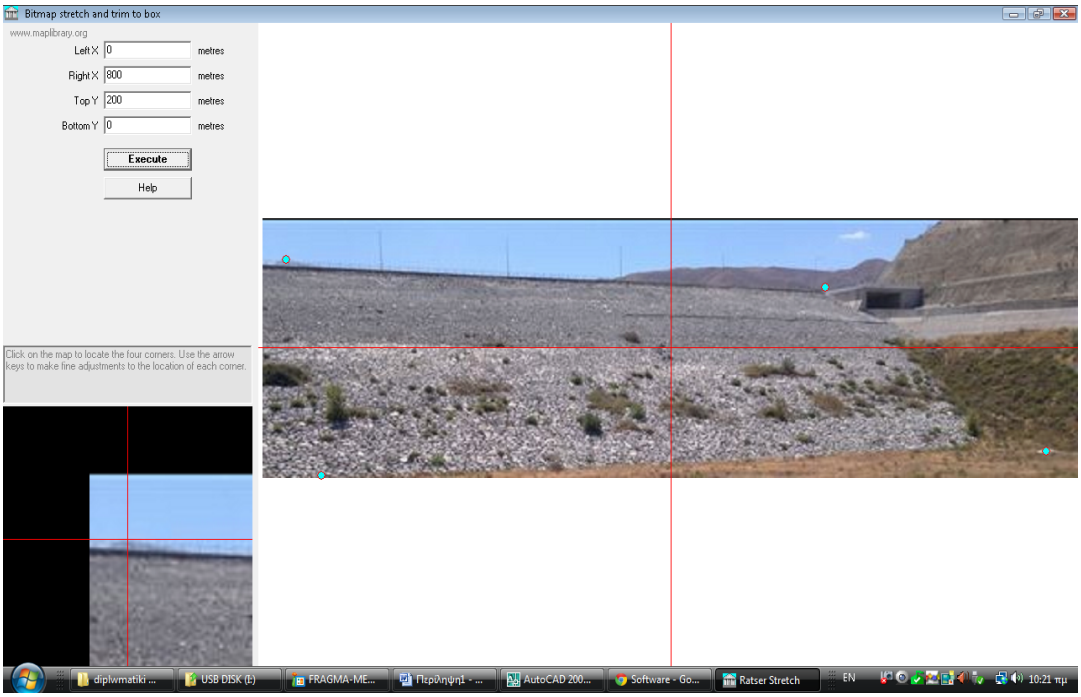
Εικόνα 30: Διανύσματα-βάσεις από τα δύο σημεία φωτοληψίας

Για τις φωτογραφίες στο ορατό, επειδή δεν είναι δυνατό να γίνει λήψη από αέρος περίπου κάθετα στο μέτωπο, έγινε λήψη φωτογραφιών από το σημείο 1 με απόσταση 122,8 m από το πόδι του φράγματος, και 182,5 m από τη στέψη, περίπου στο μισό και ανατολικά του μετώπου.

Εξαιτίας αυτού, η απεικόνιση της δυτικής (απέναντι) πλευράς του μετώπου στη φωτογραφία δείχνει την ευθεία της στέψης να συγκλίνει με την ευθεία του ποδιού-στο σημείο φυγής- ενώ είναι παράλληλες. Για αυτό απαιτείται διόρθωση.

Επίσης, επειδή η εικόνα έχει διαφορετική κλίμακα στη στέψη, στη μέση και στο πόδι, λόγω της διαφορετικής απόστασης.

Με την πρώτη μέθοδο, αρχικά έγινε η επεξεργασία στο πρόγραμμα picture manager, όπου οι εικόνες χωρίστηκαν στα δύο στη νοητή τη γραμμή των τριγωνομετρικών του φράγματος. Έπειτα μετατράπηκαν σε αρχείο bitmap για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε επειδή η εικόνα δεν έχει ενιαία κλίμακα.

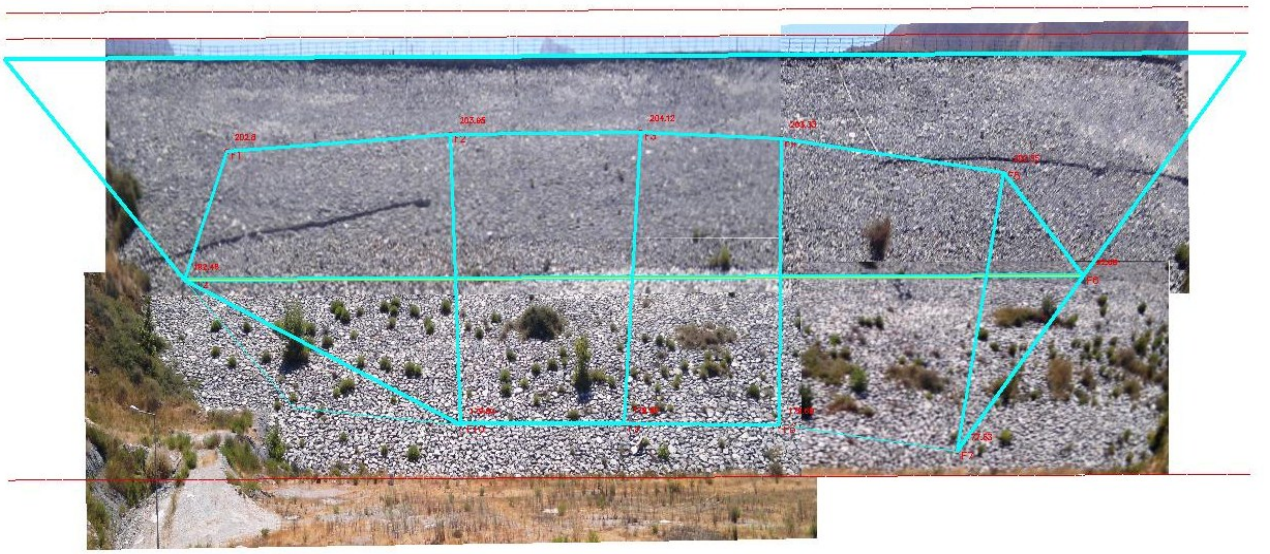


Εικόνα 31: Επεξεργασία εικόνων στο ορατό με Raster stretch.

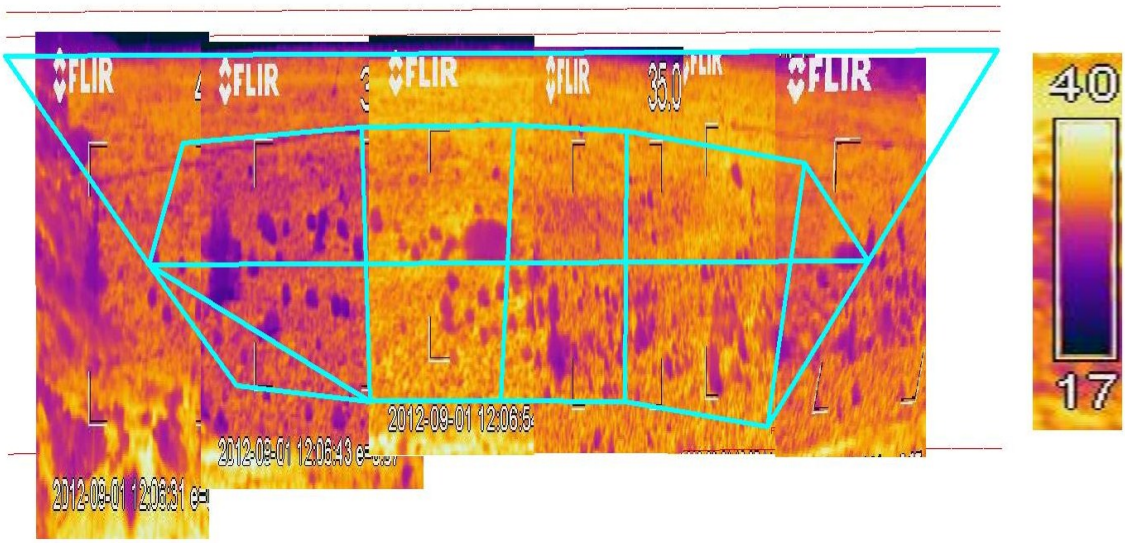
Στη συνέχεια οι δυο αυτές εικόνες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Raster stretch, όπου εκεί έγινε κατά το δυνατόν κανονικοποίηση, αλλά με ορατή μείωση της ευκρίνειας. Το πρόγραμμα αυτό, προσαρμόζει την εικόνα ώστε να εκτείνεται σε ένα ορθογώνιο και την

βαθμονομεί. Με αυτό το πρόγραμμα ορίζονται τέσσερα νέα σημεία τα οποία αποτελούν τις κορυφές του ορθογωνίου και η εικόνα εκτείνεται και περικόπτεται ώστε να ταιριάζει στα όρια του ορθογωνίου.

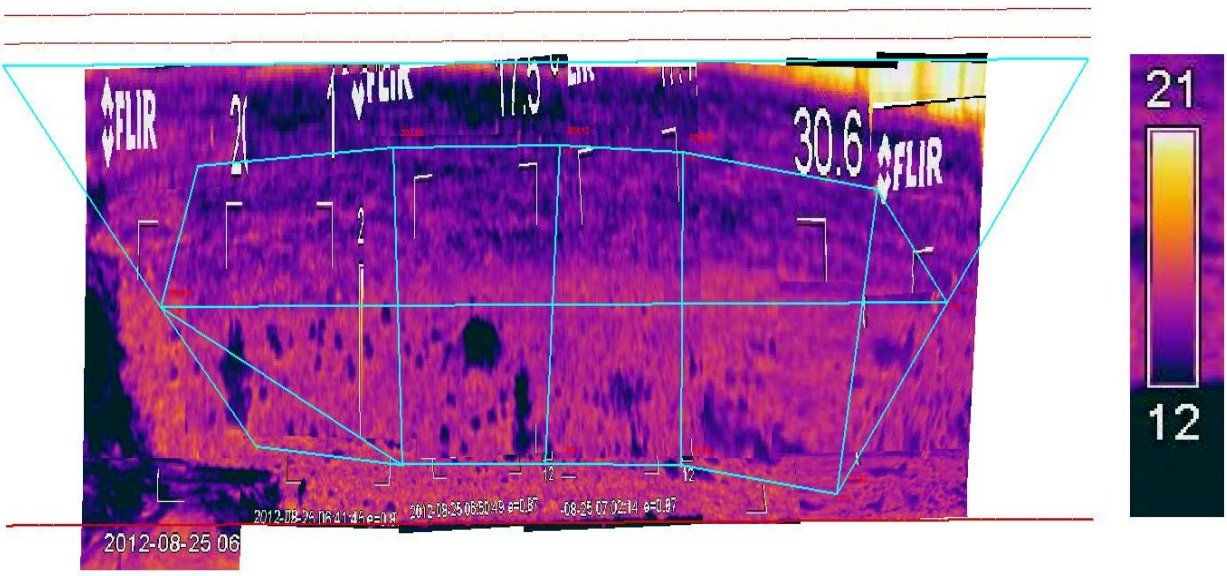
Οι τέσσερις νέες εικόνες μεταφέρθηκαν στο Autocad, όπου έγινε η αναγωγή των εικόνων σε επίπεδο x,y με βάση σημεία που είχαν προσδιοριστεί από τις μετρήσεις GPS στην στέψη, τα φωτοσταθερά ή χαρακτηριστικοί θάμνοι στους οποίους είχαν δοθεί συντεταγμένες. Το ορατό αποτέλεσε υπόβαθρο για τις μεσημεριανές λήψεις όπου δεν υπήρχαν φωτοσταθερά.



Εικόνα 32: Ορθοκανονικοποίηση των εικόνων στο ορατό με Autocad



Εικόνα 33: Γεωμετρική εγγραφή των εικόνων στο υπέρυθρο με Autocad ώρα λήψης 12μμ.



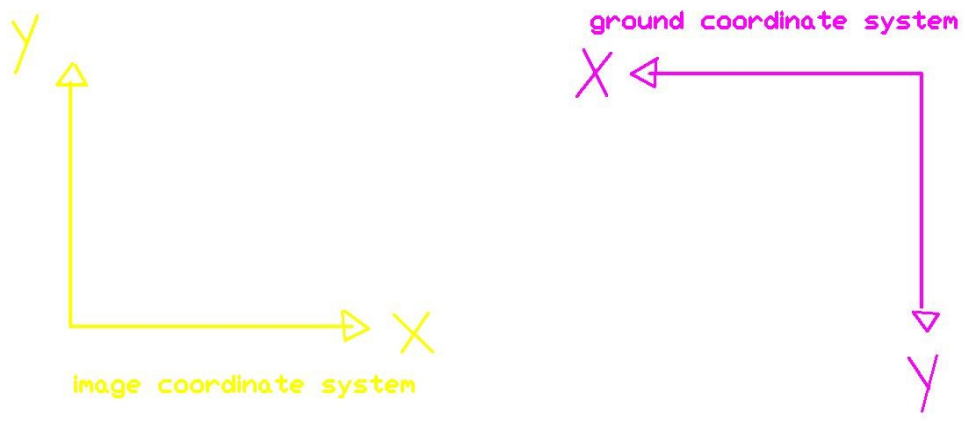
Εικόνα 34: Γεωμετρική εγγραφή των εικόνων στο υπέρυθρο με Autocad ώρα λήψης 6:30 πμ.

Οι εικόνες στο υπέρυθρο την πρωινή ώρα συνενώθηκαν βάσει των φωτοσταθερών.

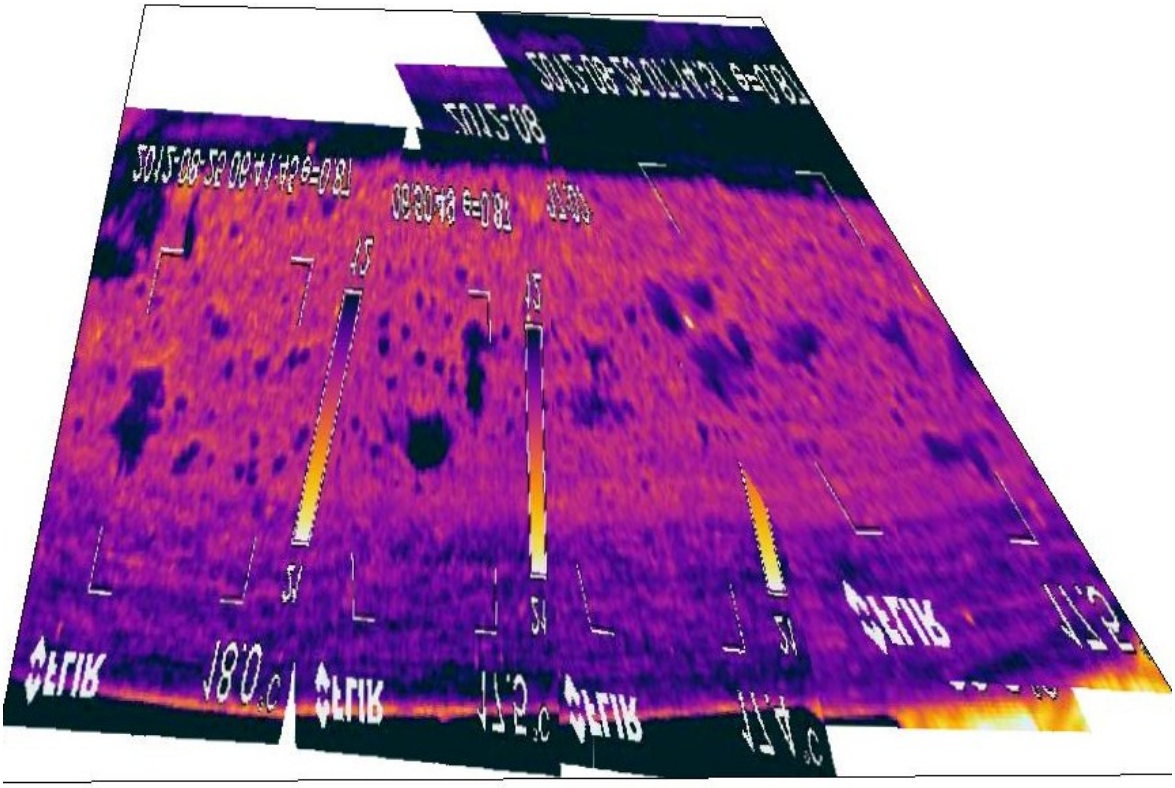
Η κλίμακα σε κάθε εικόνα προσαρμόστηκε κατά χ και y βάσει των αποστάσεων των φωτοσταθερών στο έδαφος σε σχέση με τις αποστάσεις των ίδιων φωτοσταθερών στην εικόνα.

Στην δεύτερη μέθοδο, οι εικόνες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα ArcMap του GIS. Σε κάθε εικόνα επισημάνθηκαν τα φωτοσταθερά όπου τους δόθηκαν κρατικές συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ ΄87. Η κάθε εικόνα είχε τέσσερα φωτοσταθερά και επομένως δύο ίδια (κοινά) φωτοσταθερά με την διπλανή της. Βάσει αυτών των κοινών σημείων οι εικόνες συννενόθηκαν μεταξύ τους. Ο μετασχηματισμός που χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα ήταν ο αφινικός και εφόσον τα κοινά σημεία στα δύο συστήματα αναφοράς είναι τέσσερα, η λύση δόθηκε με μια στατιστική μέθοδο όπως των ελαχίστων τετραγώνων.

Επειδή το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας είναι ανάστροφο από το σύστημα συντεταγμένων του εδάφους οι εικόνες απεικονίστηκαν προσανατολισμένες προς τα κάτω.

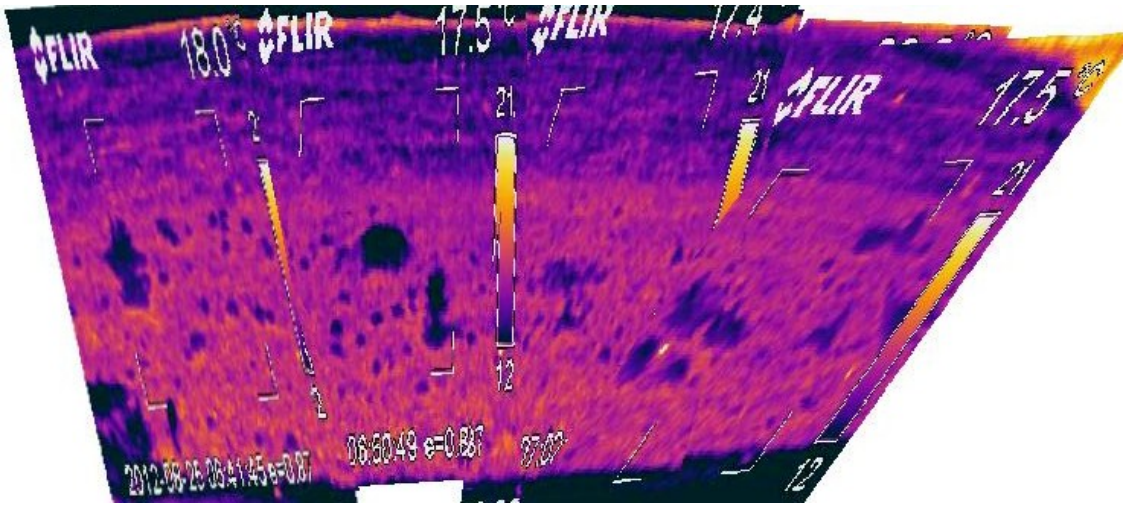


Εικόνα 35: σύστημα συντεταγμένων εικόνας και χαρτογραφικό



Εικόνα 36: αρχική απεικόνιση των εικόνων πρόγραμμα GIS

Για τον τελικό μετασχηματισμό της εικόνας, η επανάληψη της δειγματοληψίας έγινε με την μέθοδο του πλησιέστερου γειτονικού σημείου.



Εικόνα 37: αναστροφή των εικόνων

Σύγκριση των μεθόδων

Η πρώτη μέθοδος είναι πιο εποπτική σε σχέση με την δεύτερη, αφού οι εικόνες συπληρώνουν ένα κάνναβο από σημεία των φωτοσταθερών , της στέψης και της βάσης στο ΕΓΣΑ'87. Η απεικόνιση αυτή είναι ευκολότερη για την οπτική ερμηνεία των εικόνων, παρουσιάζει όμως μεγαλύτερα σφάλματα, καθώς βασίζεται σε μια παραδοχή. Η παραδοχή αυτή είναι ότι η εικόνα από την νοητή ευθεία των τριγονομετρικών μέχρι την στέψη έχει ενιαία κλίμακα, όπως και η εικόνα από την νοητή ευθεία μέχρι την βάση.

Η δεύτερη μέθοδος βασίστηκε στον αφινικό μετασχηματισμό και στην επανάληψη δειγματοληψίας με την μέθοδο του εγγύτερου σημείου. Δίνει ακριβή αποτελέσματα, καθώς η συνόρθωση των εικόνων βασίστηκε αποκλειστικά στις συντεταγμένες των φωτοσταθερών στο έδαφος.

4.3 Συμπεράσματα- προτάσεις

Οι υπέρυθρες εικόνες έδειξαν μια θερμοκρασιακή διαφορά, στο άνω μέρος του φράγματος σε σχέση με το κάτω. Η διαφορά είναι της τάξεως 2-3° C και οφείλεται στο διαφορετικό όγκο και διαφορετική σύσταση των ασβεστολίθων που απαρτίζουν το μέτωπο. Μεγαλύτερος όγκος έχει μεγαλύτερη ειδική θερμοχωρητικότητα (θερμοχωρητικότητα /μονάδα όγκου ή μάζας) και ως εκ τούτου εμφανίζεται πιο θερμός στην υπέρυθρη εικόνα, κατά την αυγή. Ακόμα ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόκρισή τους στα δύο μέρη του φράγματος είναι η διαφορετική τους σύσταση και κατά συνέπεια το χρώμα κάτι το οποίο διαφένεται και στο ορατό. Λευκοί ασβεστόλιθοι στο κάτω μέρος, έχουν υψηλότερη ανακλαστικότητα και εμφανίζονται πιο φωτεινοί, σε σχέση με τους σκουρότεφρους του άνω μέρους.

Οι θάμνοι παρουσιάζονται με θερμοκρασία 12-13 ο C τις πρωινές ώρες, ενώ η θερμοκρασία τους κατά τις μεσημεριανές ώρες είναι 18-19 ο C. Η ανακλαστικότητα της βλάστησης επηρεάζεται από το σχήμα των φύλλων, την φυσιολογία του φυτού και τις καιρικές συνθήκες. Στις εικόνες εμφανίζονται ψυχρότεροι στόχοι κάτι το οποίο ευνόησε την συνόρθωση των εικόνων κατά την διάρκεια του μεσημεριού όπου δεν υπήρχαν φωτοσταθερά.

Η θερμική ακτινοβολία είναι ικανή να ανιχνεύσει την υγρασία των πρώτων χιλιοστών της επιφάνειας, καθώς η εδαφική υγρασία παρουσιάζει χαμηλότερες θερμοκρασίες, λόγω αυξημένη ψύξη-εξάτμιση. Γενικά εδάφη με μεγάλη υγρασία παρουσιάζουν μικρότερο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος στις επιφανειακές θερμοκρασίες τους σε σχέση με τα ξηρότερα εδάφη. Η θερμοκρασία της επιφάνειας της γης που καταγράφεται από δορυφορικό αισθητήρα, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τοπίου, αν υπάρχει βλάστηση, τσιμέντο, υδάτινοι όγκοι. Οι παράγοντες που επηρεάζουν επιπρόσθετα, είναι η τοπογραφία (ορεινοί όγκοι, χαράδρες, κλίσεις φυσικών πρανών) και η σύσταση και υγρασία του εδάφους.

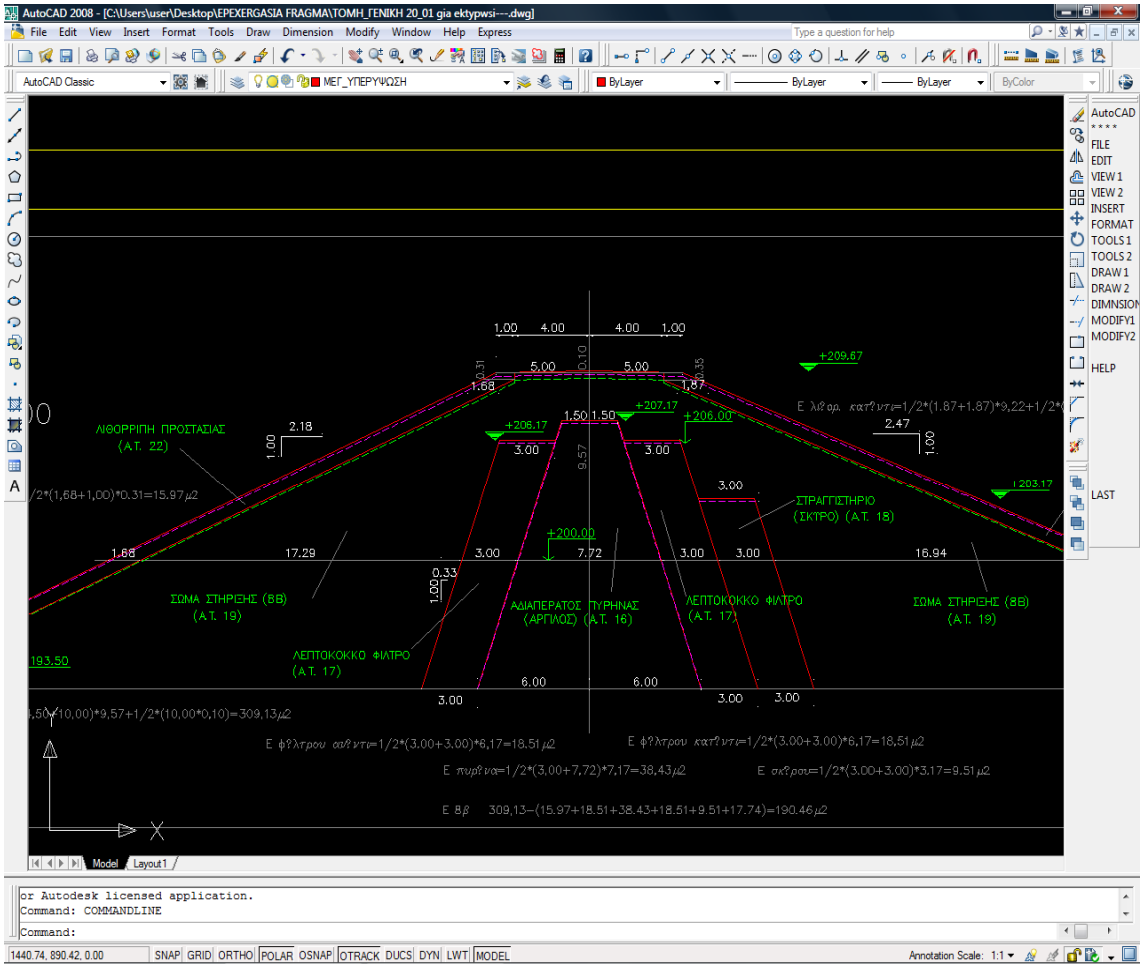
Επειδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει μικρή διεισδυτικότητα στο έδαφος, οι δυνατότητες της τηλεπισκόπησης, περιορίζονται στον προσδιορισμό μόνο επιφανειακών εδαφών και μετρήσεων.

Δεν παρατηρείται υγρασία καθώς τα πετρώματα εάν εμποτίζοταν από το νερό του ταμιευτήρα, θα αναμενόταν χαμηλότερη θερμοκρασία από το αντίστοιχο υψόμετρο της στάθμης και μέχρι το πόδι. Η στάθμη ανάντι του φράγματος την περίοδο μέτρησης βρισκόταν στα 200 m περίπου, ενώ η επιφανειακή θερμοκρασία του νερού κατά τις πρωινές ώρες ήταν 20 ο C. Σε περίπτωση διαφυγών, η θερμοκρασία που θα αναμενόταν θα ήταν η θερμοκρασία του κατώτερου στρώματος νερού της λεκάνης, περίπου (15ο C) το οποίο δεν επηρεάζεται από θερμοκρασιακές διαφορές κατά την διάρκεια του έτους. Αυτή η θερμοκρασία θα αναμενόταν και στις δύο μετρήσεις (την αυγή και το μεσημέρι).

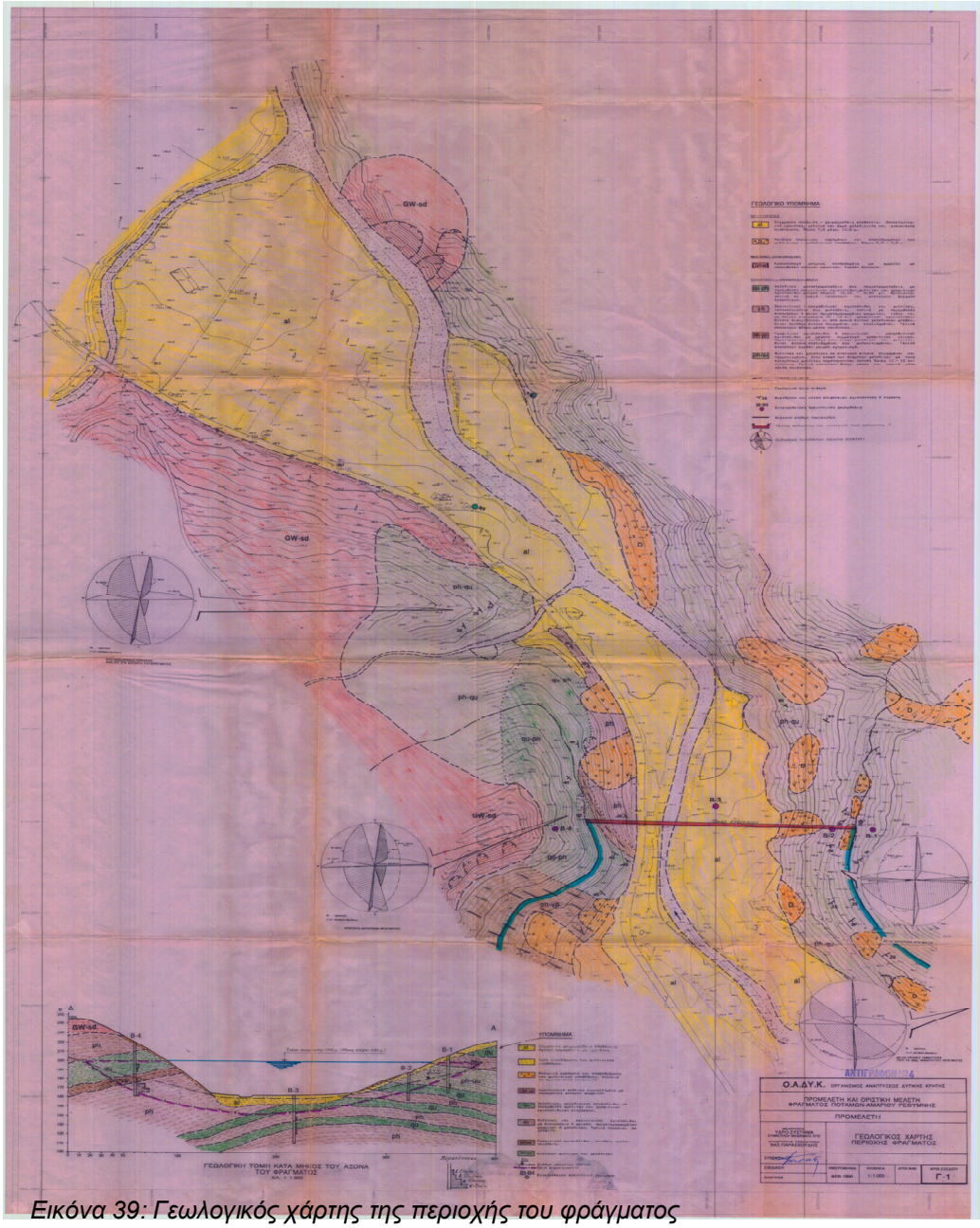
Ακόμη, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να ακολουθηθεί και σε εφαρμογές υπέρυθρου εντοπισμού με λήψεις από αέρος. Η δημιουργία δικτύου σταθερών σημείων (θερμικών στόχων), με ταυτόχρονο προσδιορισμό τους στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων είναι χρήσιμη για την διόρθωση και χαρτογράφηση των υπέρυθρων εικόνων. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να οφείλονται στο προσανατολισμό του αεροσκάφους, στο υψόμετρο της λήψης, στην κλίση της επιφάνειας.

Τέλος,στην περιοχή των διαρροών χρήσιμη θα ήταν η ερμηνεία των υπέρυθρων δορυφορικών εικόνων για την παρακολούθηση της πορείας των διαφυγών.

Παράρτημα



Εικόνα 38: Γενική τομή του φράγματος



Εικόνα 39: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του φράγματος

Εικόνα 40: Αεροφωτογραφία της περιοχής

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική

1.Μερτίκας, Σ.Π. (1999). **Τηλεπισκόπηση και ψηφιακή ανάλυση εικόνας** , Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.

2. Παπαμάρκος,Η. (2010), **Ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυση εικόνας,** Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, τμήμα ΗΜκΜΥ, εκδοση Β'.

3. Κατσουγιαννόπουλος Σ.(2008) **Αναγωγή στοιχείων σε χαρτογραφικό επίπεδο**, Τ.Ε.Ι Σερρών, τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας.

Διεθνής

1.Minkina W. and Dudzik S.(2009). **Infrared Thermography, Errors and Uncertainties,** A John Wiley and Sons ,Ltd, Publication, Czestochowa University of Technology, Poland.

2.Rogalski A. and Chrzanowski K.(2002). **Infrared devices and technics** (contributed paper) Military University of Technology Warsaw, Poland.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

1.Μπαντέκας, Ι(1978), **Φωτοερμηνεία Τηλεπισκόπηση** ΕΜΠ. Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

2. Υδροσύστημα ΕΠΕ (1990), **Γεωλογική-υδρογεωλογική μελέτη φράγματος** Ποταμών Αμαρίου.

4.Φωτίου Α.-Πικριδάς Χ.,(2006) **GPS και γεωδαιτικές εφαρμογές**, Εκδόσεις Ζητη,Θεσσαλονίκη.

5.Μερτίκας, Σ.Π **Εισαγωγή στη Γεωδαισία και τον Δορυφορικό Εντοπισμό,** Πολυτεχνείο Κρήτης

6. Κάρταλης Κ.-Φειδάς Χ.,(2006) **Αρχές και εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης**, Γκιούρδας εκδοτική, Αθήνα.

7. Αδάμ Κ.(2011) **Γεωμετρία του στερεοζεύγους από βαθμονομημένες και από μη βαθμονομημένες μηχανές**, διπλωματική εργασία, ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Διεθνής

1. *Jensen* J.(2007). **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**-2nd edition. Pearson Prentice Hall,USA

2. Holst G.(2000). **Common sense approach to thermal imaging**,JCD Winder Park, Florida USA and SPIE publications Bellingham, Washington USA.

3. Budzier H. and Gerlach G. (2011). **Thermal Infrared Sensors theory, optimisation and practice**, A John Wiley and Sons ,Ltd, Publication, Dresden University of Technology, Germany