

# Η συμβολή της εναέριας θερμογραφίας στην επιθεώρηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Περίληψη.

Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης αναφέρεται στα αποτελέσματα της εναέριας θερμογραφίας ενός φωτοβολταϊκού πάρκου και την σύγκριση των αποτελεσμάτων με επίγεια θερμογράφιση του. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός: **eBee drone** από την **senseFly**, **thermoMAP sensor** από την **senseFly**, **eMotion software** για τον σχεδιασμό πτήσης από την **senseFly**, **Pix4D Mapper Pro** λογισμικό επεξεργασίας των εικόνων από την **Pix4D**, και η θερμοκάμερα **Flir T400** για επιθεώρηση στο έδαφος.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΑΣΙΚΗ ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Η θερμογραφική επιθεώρηση αναφέρεται στον έλεγχο αντικειμένων και την παρακολούθηση των θερμικών μεταβολών τους. Θερμογραφικές κάμερες ή θερμοκάμερες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας που ακτινοβολεί ένα αντικείμενο. Αυτές οι κάμερες ανιχνεύουν ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (9μm έως 14μm ) και παράγουν εικόνες αυτής της ακτινοβολίας με τη μετατροπή της ενέργειας από το υπέρυθρο μήκος κύματος στο ορατό φάσμα της οθόνης. Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα πάνω από το απόλυτο μηδέν με αποτέλεσμα η θερμογραφία να καθίσταται δυνατή να συλλάβει εικόνες των αντικειμένων ακόμα και στην περίπτωση απουσίας φωτισμού. Η ποσότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, με την χρήση της θερμογραφίας εμφανίζονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας . Μια θερμική εικόνα δείχνει ζεστά αντικείμενα που ξεχωρίζουν σε σχέση με τα ψυχρότερα. Σήμερα, η θερμογραφική επιθεώρηση χρησιμοποιείται κυρίως στις παρακάτω εφαρμογές:

- Παρακολούθηση μεταβολών
- Κτιριακή και βιομηχανική επιθεώρηση
- Θερμική χαρτογράφηση
- Ιατρική απεικόνιση
- Αρχαιολογία
- Επιτήρηση χώρων
- Νυχτερινή όραση
- Ασφάλεια, Επιβολή νόμου, Άμυνα

Ένα ηλιακό πάνελ είναι ένα άθροισμα των ηλιακών συλλεκτών που υποστηρίζονται από ένα σκληρό σκελετό . Οι ηλιακοί συλλέκτες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από τη μετατροπή της

φωτεινής ενέργειας ( φωτόνια ) σε DC ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Υπάρχουν πολλές ηλιακές κυψέλες σε ένα πάνελ . Η τάση ενός ηλιακού πάνελ είναι το άθροισμα της τάσης όλων των κυψελών του. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι πλέον μια επικρατούσα λύση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεδομένου ότι χρησιμοποιούν μια ανανεώσιμη πηγή όπως το φως. Τα ηλιακά πάνελ αναμένεται να έχουν μια διάρκεια ζωής 20+ ετών γεγονός που δεν συμβαίνει συχνά. Πολλοί κατασκευαστές προμηθεύουν προϊόντα στην αγορά με μεγάλη διακύμανση την ποιότητα τους. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατά κύριο λόγο υπολογίζονται για μια διάρκεια ζωής 20 ετών λαμβάνοντας υπόψη την γήρανση που επέρχεται σε αυτά. Καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα γηράσκουν χάνουν σταδιακά τις αποδόσεις τους. Οι υπολογισμοί όμως της διάρκειας ζωής λαμβάνοντας υπόψη την γήρανση δεν μπορούν να λάβουν υπόψη και κάποιους εξωγενείς παράγοντες όπως τα καιρικά φαινόμενα (κεραυνοί, χαλάζι), την υπερθέρμανση κάποιων κυψελών καθώς και την αστοχία καποιου υλικού.

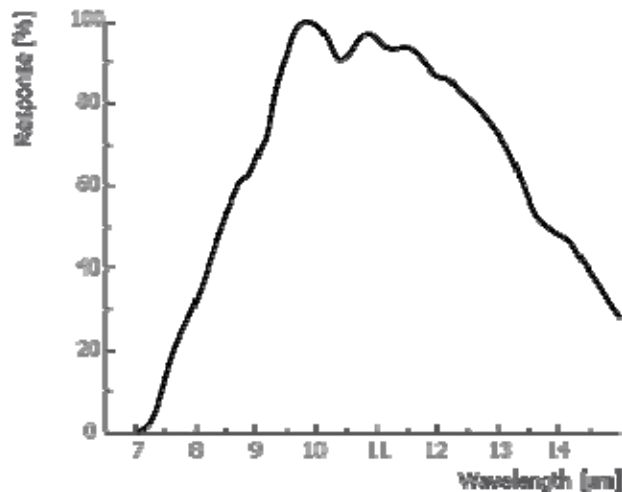
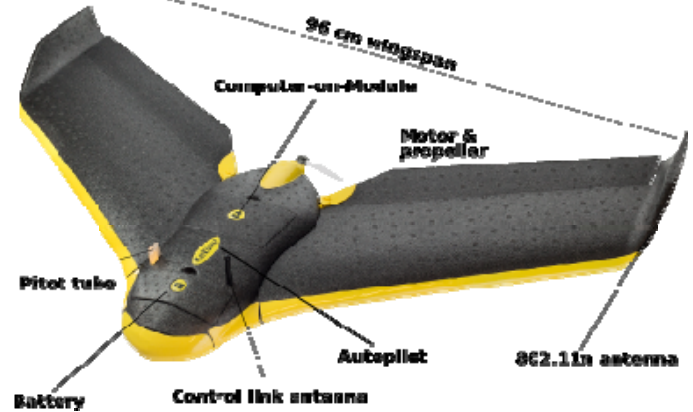
**M**έχρι την ανάπτυξη της τεχνολογίας της θερμογραφίας, η αντιμετώπιση προβλημάτων σε σχέση με την αξιολόγηση της ποιότητας μιας φωτοβολταϊκής εγκατάσταση ήταν χρονοβόρα και δύσκολη εργασία. Η Θερμική απεικόνιση επιτρέπει την εμφάνιση των θερμικών ανωμαλιών στα πάνελ και σε αντίθεση με παλιές μεθόδους , μπορεί να εφαρμοστεί κατά την κανονική λειτουργία τους. Οι θερμοκάμερες μπορούν να ξεχωρίζουν τα θερμά σημεία σε ένα ηλιακό πάνελ . Ένα θερμό σημείο μπορεί να είναι μια μεμονομένη κυψέλη ή μια σειρά που έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από τις υπόλοιπες κυψέλες του ηλιακού συλλέκτη. Αλλά γιατί μια υψηλότερη θερμοκρασία είναι τόσο σημαντική; Εκτιμάται ότι μια άνοδος της θερμοκρασίας στο πάνελ κατά 10°C μπορεί να μειώσει την απόδοση του ρεύματος κατά 5% . Τα θερμά σημεία (Hotspots) είναι κυψέλες με υψηλή αντίσταση που καταναλώνουν αντί να παράγουν ενέργεια. Η υψηλή θερμοκρασία τους αυξάνει τη θερμοκρασία του πάνελ και μειώνει συγχρόνως την τάση εξόδου του.

Οι πιο συνηθισμένοι λόγοι που μπορεί να οδηγήσουν σε δημιουργία θερμών σημείων στα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι οι ακόλουθοι:

- Χαμηλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία
- Καιρικά φαινόμενα
- Ελαττωματική δίοδος
- Βραχυκυκλώματα
- Κακές ηλεκτρολογικές συνδέσεις
- Εισχώρηση βρωμιάς ή υγρασίας
- Κεραυνοί
- Γήρανση
- Ραγισμένες κυψέλες
- Μη συνδεδεμένα ή χαλασμένα πανέλα
- Λάθη σε συνδεσμολογία

Το 2014, η ελβετική εταιρεία senseFly ανακοίνωσε έναν θερμικό αισθητήρα για τον εξοπλισμό eBee. Η εταιρεία GEONSENSE ήταν μεταξύ των 11 αντιπροσώπων που απέκτησαν τον αισθητήρα ως ελεγκτές του προϊόντος. Οι τεχνικές προδιαγραφές του αισθητήρα είναι οι εξής:

Μέγεθος εικόνας	640 x 512 pixels
Ανάλυση εδάφους στα 75m	14cm/px
Εύρος θερμοκρασίας	-40 °C to 160 °C
Ανάλυση θερμοκρασίας	0.1 °C
Ρύθμιση θερμοκρασίας	Automatic, in-flight
Output formats	TIFF images + mp4 video
Βάρος	Approx. 134 g
Υψόμετρο χρήσης	75 - 150 m



**eBee**  
senseFly



## ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΡΓΟ

Οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων αναμφίβολα έχουν αποτελέσει μια από τις μεγαλύτερες και πιο επικερδείς επιχειρήσεις στην Ελλάδα τα τελευταία δέκα χρόνια. Στο καλύτερο της γνώσης μας, όχι μόνο υπάρχει μια ισχυρή αναγκαιότητα για την εφαρμογή θερμογραφικών ελέγχων, αλλά και μια πραγματικότητα δεδομένου του γεγονότος ότι ένα μεγάλο ποσοστό των εγκαταστάσεων σήμερα πλησιάζουν το μισό της διάρκειας ζωής τους.

Η πιλοτική μελέτη μας είναι μια εγκατάσταση που βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα. Η ισχύς της παραγωγής του προς μελέτη φωτοβολταϊκού πάρκου είναι 1MWp. Η εγκατάσταση βρίσκεται σε μια σχεδόν επίπεδη έκταση, με υψομετρική διαφορά μεταξύ του υψηλότερου και του χαμηλότερου σημείου περίπου 13m. Πρώτη σκέψη μας ήταν, το ποίο θα πρέπει να είναι το σωστό ύψος πτήσης, προκειμένου να μας δώσει χρήσιμες πληροφορίες. Δεδομένου ότι ψάχνουμε για θερμά σημεία (hotspots - κυψέλες σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες), απευθυνθήκαμε στον παρακάτω πίνακα που προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του θερμικού αισθητήρα (ThermoMap).

Height ATO(m)	ThermoMAP pixel size (cm/pixel)
70	13.2
60	11.3
50	9.4
40	7.6

Ο παραπάνω πίνακας, περιγράφει το μέγεθος των ρixel που μπορεί να επιτευχθεί σύμφωνα με το ύψος πτήσης (Πάνω από το υψόμετρο απογείωσης - ATO). Γνωρίζουμε ότι κάθε κυψέλη των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει μέγεθος 15cm X 15cm. Έτσι, μια πτήση περίπου στα 70 μέτρα ATO θα απεικονίζει κάθε κυψέλη ως ένα ρixel. Η ίδια πτήση στα 40μ ATO θα απεικονίζει κάθε κυψέλη σε 2 x 2 = 4 ρixel.

Ένας δεύτερος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την χρονική διάρκεια της μέτρησης. Έτσι κατά την εκτέλεση της θερμικής απεικόνισης στο φωτοβολταϊκό πάρκο χρειάστηκε να λάβουμε υπόψη τις ακόλουθες παραμέτρους:

α) Ύπαρξη επαρκούς ενέργειας από τον ήλιο για να επιτευχθεί μια καλή θερμική αντίθεση. Ένα ελάχιστο των 500W / m<sup>2</sup> ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητο για να γίνει μια ακριβής θερμογραφική απεικόνιση.

- β) Ο ουρανός θα πρέπει να είναι χωρίς σύννεφα έτσι ώστε κατά την διάρκεια της πτήσης να μην υπάρχει καμία σκίαση.
- γ) Η χαλαρή ροή ανέμου είναι επίσης αναγκαία γιατί δρα ψυκτικό πάνω στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη θερμική αντίθεση.
- δ) Μία ψυχρή μέρα θα είχε περισσότερο νόημα από μια ζεστή μέρα αφού επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της θερμικής αντίθεση.

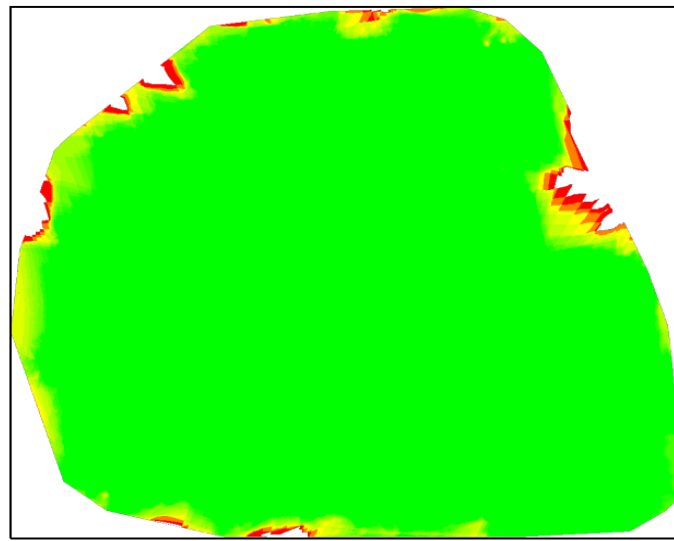
**Η** πτήση της θερμικής απεικόνισης πραγματοποιήθηκε στις 13 Φεβρουαρίου του 2015 στις 13:00 τοπική ώρα (GMT + 2). Το eBee απογειώθηκε πλάι από την προς μελέτη περιοχή. Η πτήση διήρκεσε για περίπου 12 λεπτά με θερμοκρασία περιβάλλοντος 7οC. Η εκτιμώμενη ηλιακή ακτινοβολία ήταν περίπου 600W / m2 και ο άνεμος ήταν μεταξύ 0,9 και 1,5 m/sec . Το μέγεθος της προς θερμογράφησης περιοχής ήταν 0.1Km2 και το πλήθος των θερμογραφικών εικόνων ήταν 2013 με μέγεθος δεδομένων 1.23Gbytes. Επειδή στη συγκεκριμένη πτήση το ζητούμενο δεν ήταν η απόλυτη ακρίβεια αλλά η θερμική απεικόνιση δεν χρειάστηκε να χρησιμοποιηθούν GCPs και η ακρίβεια του εσωτερικού GPS του eBee ήταν περισσότερο από αρκετή.



*Το σχέδιο πτήσης πάνω από το φωτοβολταϊκό παρκο.*

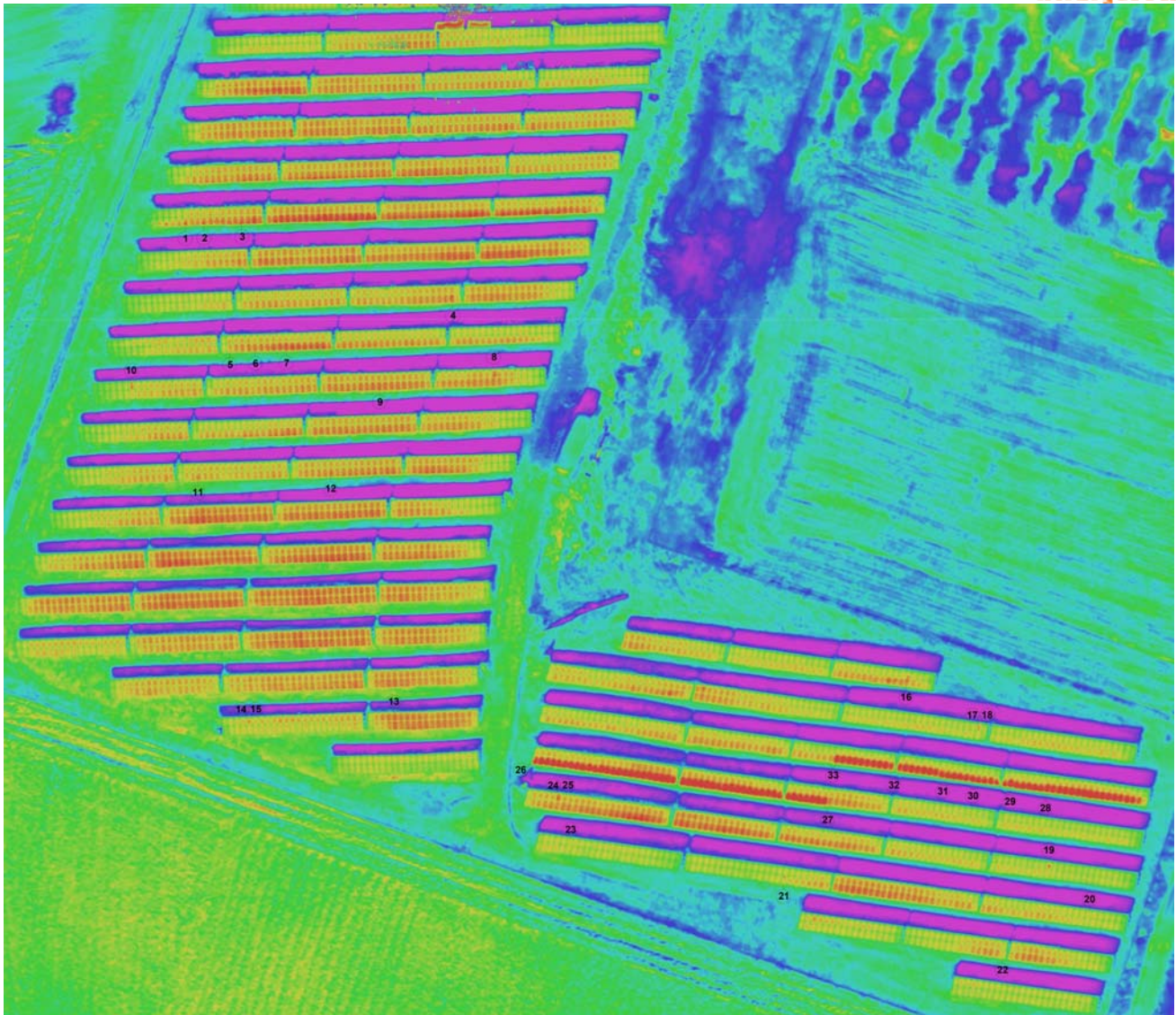
**Τ**ο επόμενο βήμα ήταν η επεξεργασία της σειράς των φωτογραφιών έτσι ώστε να ταιριάξουν όλες μαζί και να παραχθεί ο χάρτης της θερμικής ανάκλασης του φωτοβολταϊκού πάρκου. Για την δημιουργία του χάρτη ανάκλασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Terra 3D της PiX4D. Λόγω της επεξεργασίας, υπήρξε κάποια γενίκευση που οδήγησε το μέγεθος pixel στα 8 cm. Η εικόνα που ακολουθεί δείχνει τις επικαλυπτόμενες εικόνες που έχουν ληφθεί πάνω από την περιοχή μελέτης όπου το κόκκινο χρώμα δείχνει περιορισμένη επικάλυψη των εικόνα ενώ το πράσινο χρώμα δείχνει ισχυρή υπερκάλυψη.



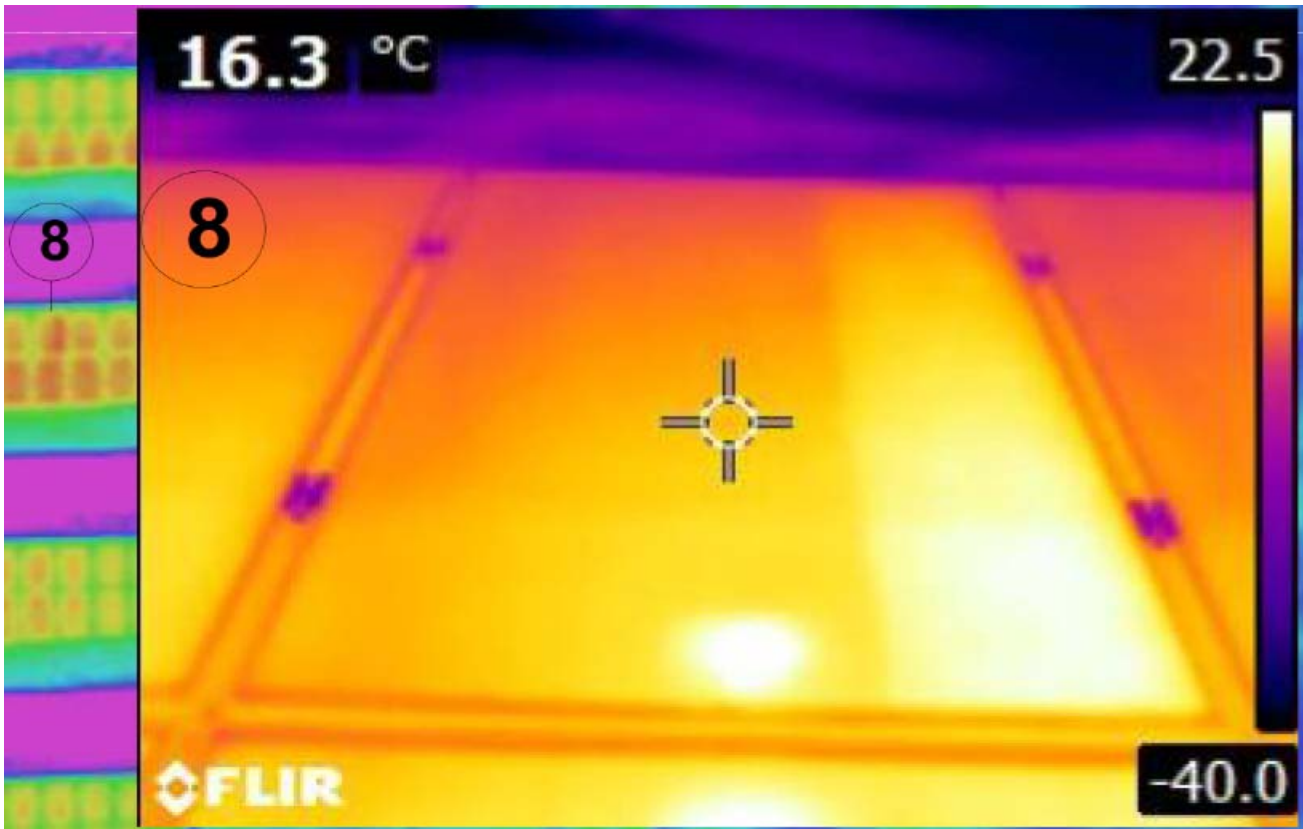


Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

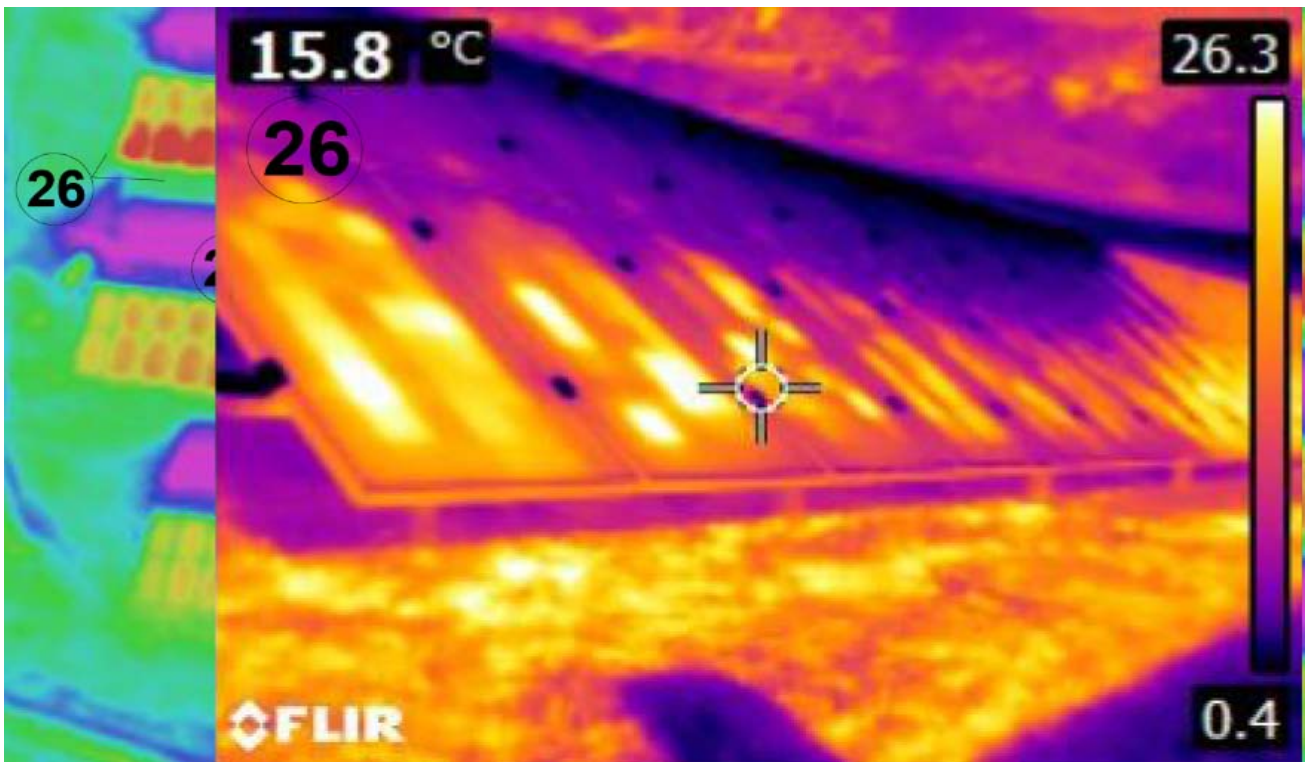
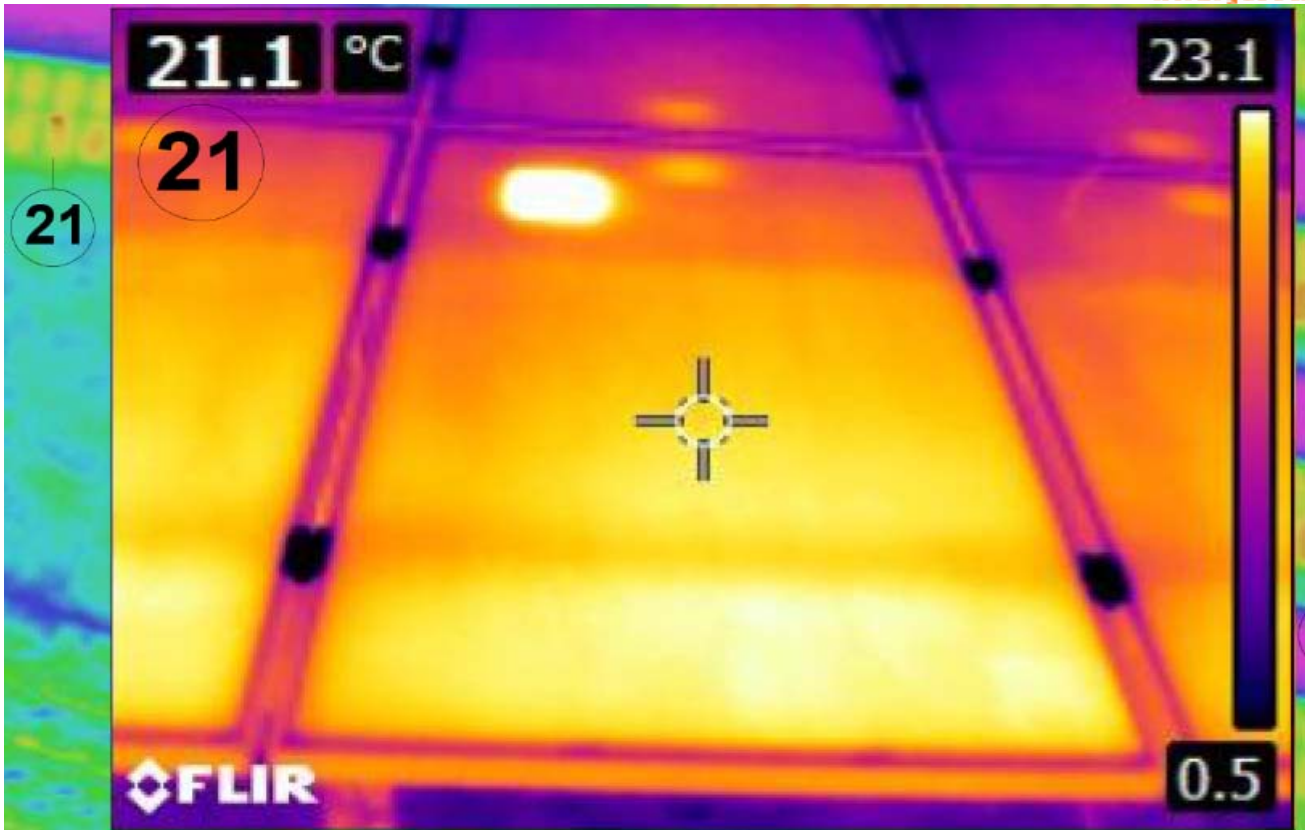
Ο χάρτης ανάκλασης καθώς και ο θερμικός χάρτης προέκυψαν όπως αναμενόταν. Η ανάλυση ήταν ιδανική. Ήταν εύκολο να εντοπιστούν τα θερμά σημεία. Επιπλέον, ανακαλύψαμε ομάδες των ηλιακών συλλεκτών που έχουν σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία από ό,τι άλλες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι περίπου τεσσάρων ετών, εκτιμούμε ότι περίπου 150 φωτοβολταϊκά πλαίσια από το σύνολο των 4.150 χρειάζεται επισκευή ή αντικατάσταση. Ακόμα, έπρεπε να ελέγξουμε και να διασταυρώσουμε τα αποτελέσματα από τον θερμικό χάρτη με μετρήσεις στο έδαφος. Για το λόγο αυτό, πήραμε 33 διαφορετικές περιπτώσεις που εμφανίζονταν στον θερμικό χάρτη, και τις διασταυρώσαμε στο έδαφος με θερμοκάμερα. Ο παρακάτω θερμικός χάρτης, δείχνει κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις.

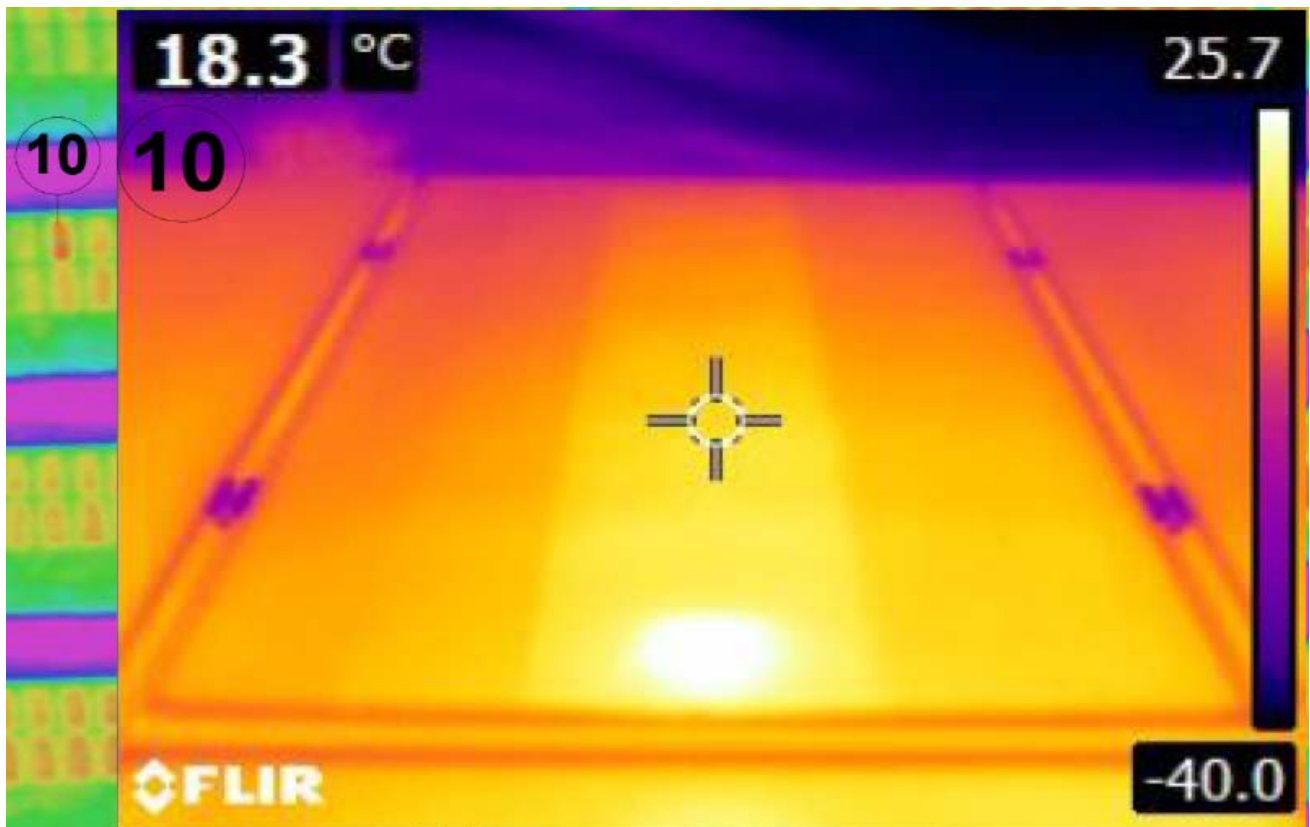
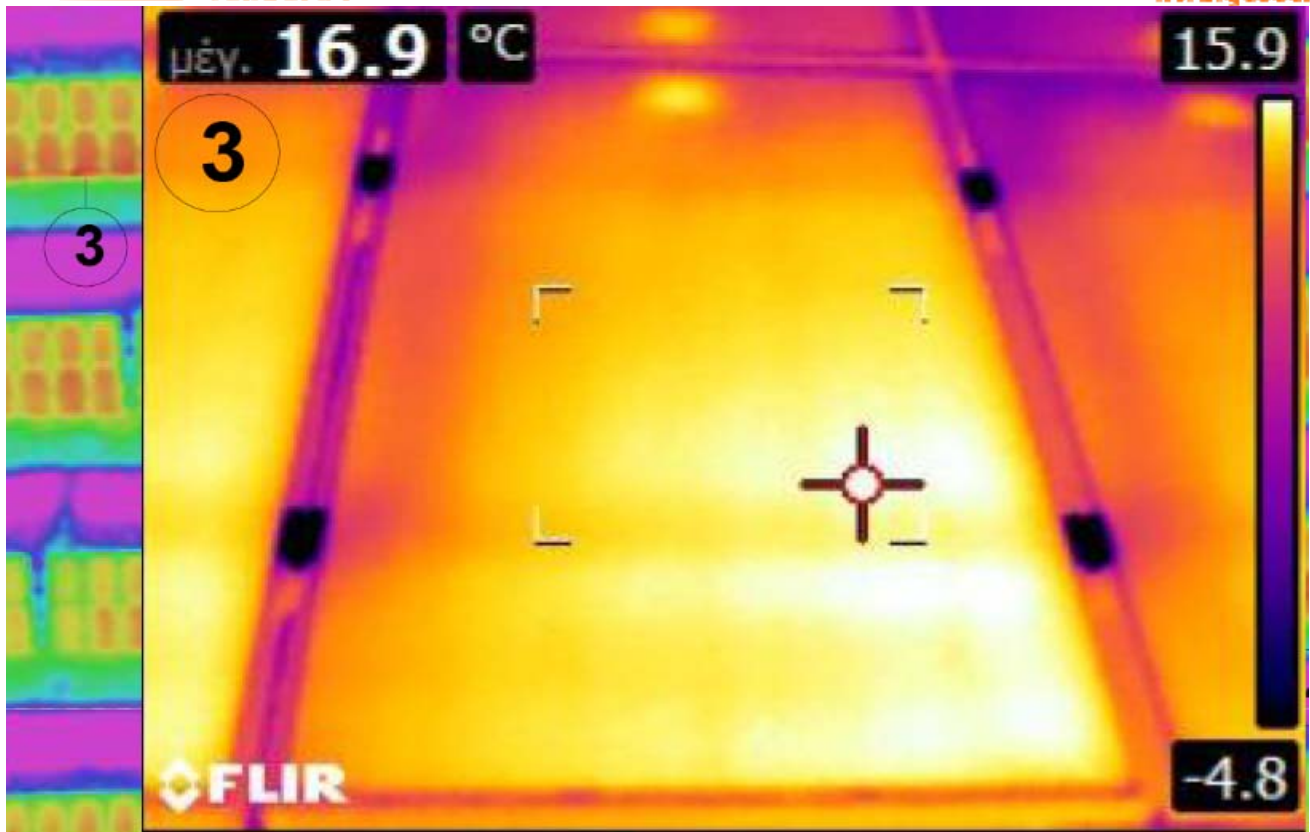


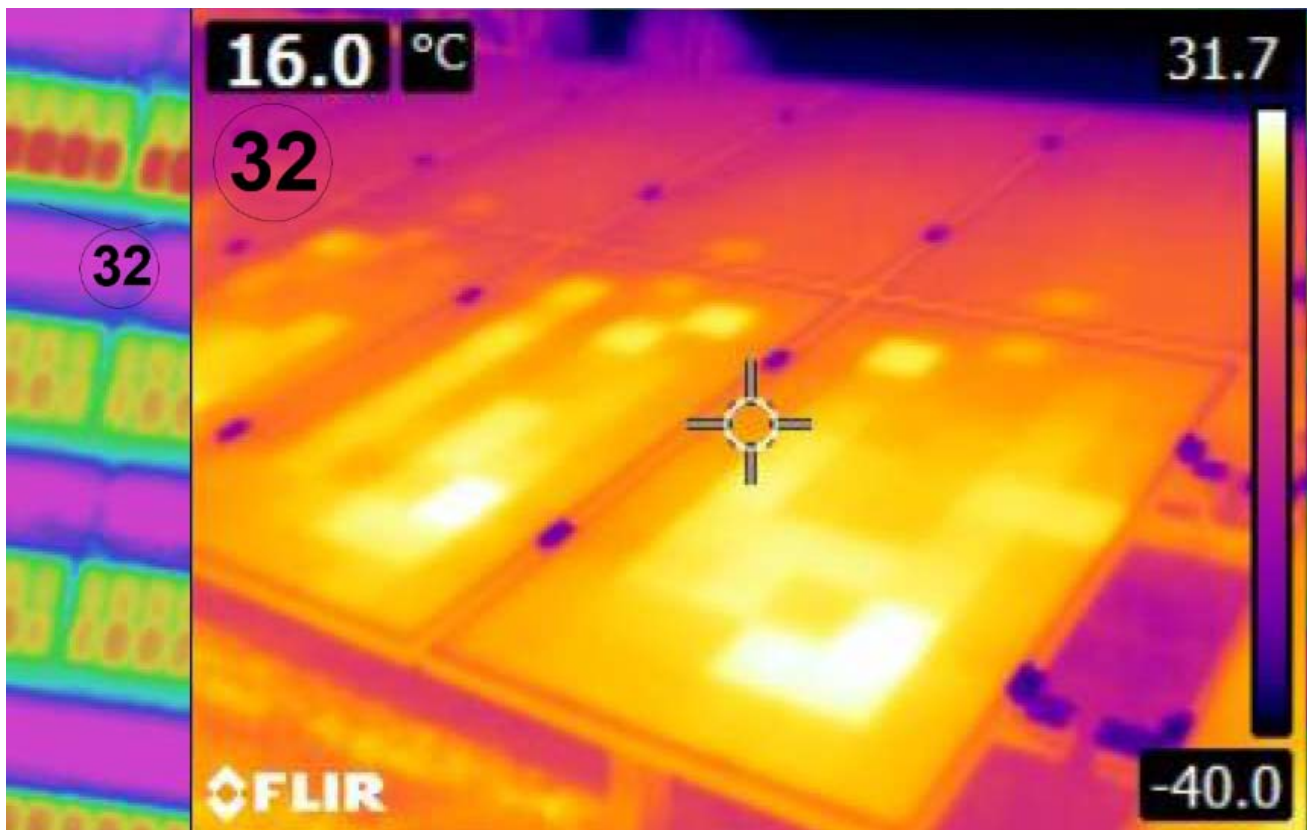
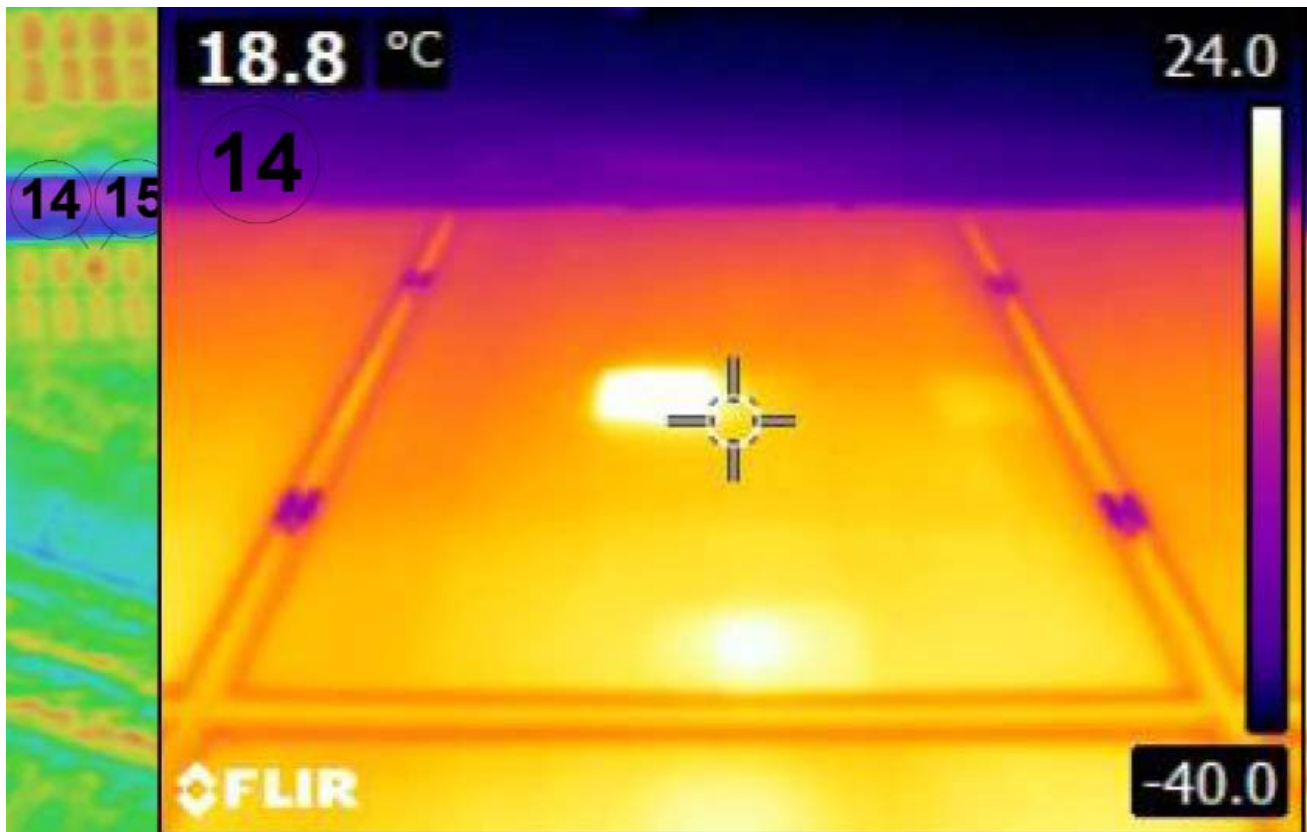
Για την θερμογράφηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε θερμοκάμερα της Flir μοντέλο T400. Οι φωτογραφίες παρακάτω δείχνουν κάποια από τα αποτελέσματα:

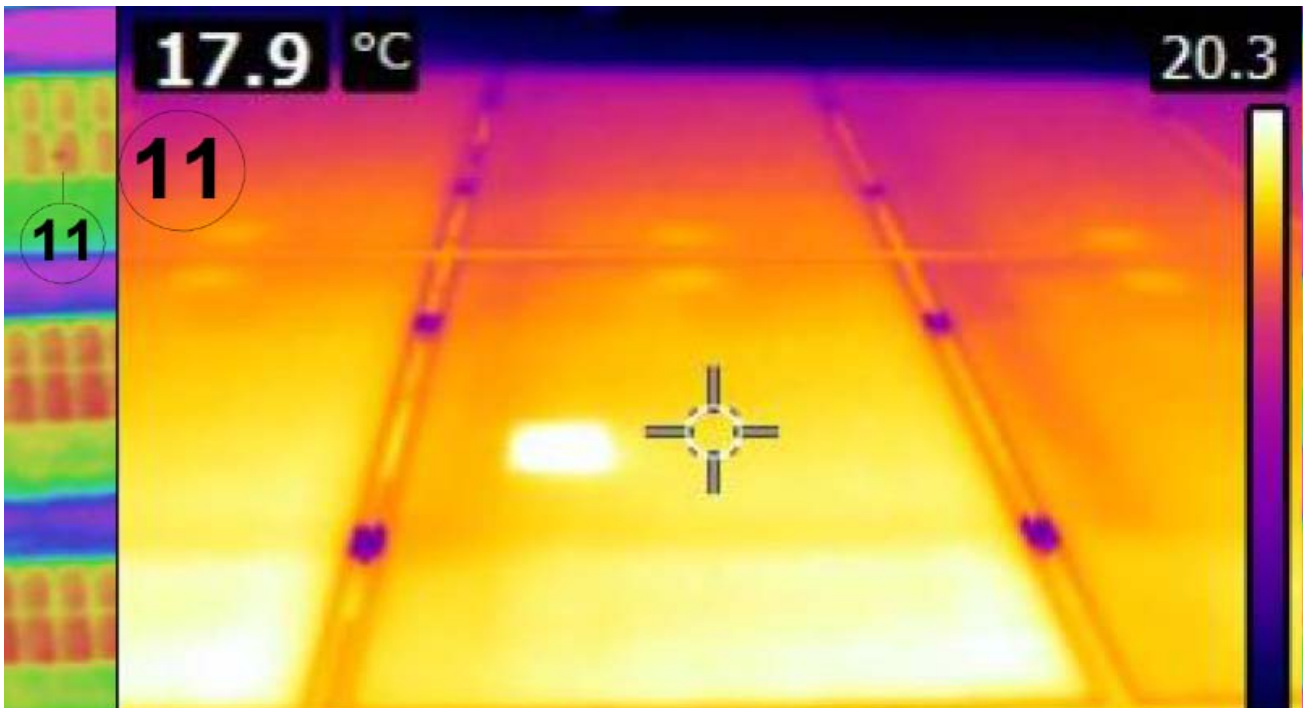












## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε τον συνδυασμό της χρήσης του eBee μαζί με το ThermoMAP για την επιθεώρηση φωτοβολταϊκών πάρκων. Με βάση τα αποτελέσματα μπορούμε να συνοψίσουμε στα εξής:

1. Οι εγκαταστάσεις Φωτοβολταϊκών πάρκων μπορούν να επιθεωρούνται από τον αέρα, με τη χρήση του eBee (UAV) που φέρει επάνω του τον αισθητήρα ThermoMAP, με μεγάλη επιτυχία.
2. Το βέλτιστο ύψος πτήσης συνδέεται στενά με τις διαστάσεις της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Η τυπική διάσταση της είναι 15x15cm, οπότε ένα ύψος πτήσης των 40m ATO μπορεί να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα (κάθε κυψέλη περίπου 4 pixel). Επίσης πριν από κάθε πτήση θα πρέπει να εξετάζεται η μορφολογία του εδάφους καθώς και το σημείο απογείωσης έτσι ώστε να μην διακινδύνευση η ακεραιότητα του ebee από τυχόν συντριβή σε κάποιο εμπόδιο. Σε περιπτώσεις έντονου ανάγλυφου συστήνεται πρώτα μια πτήση με οπτική κάμερα και δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους και στη συνέχεια πριν την πτήση με ThermoMap την εισαγωγή του μοντέλου έτσι ώστε το ebee να κρατάει σταθερά το υψόμετρο του πάνω από το πάρκο.
3. Οι καιρικές συνθήκες παίζουν το ρόλο τους, έτσι μια ήρεμη ηλιόλουστη μέρα με σχετική χαμηλές θερμοκρασίες μεγιστοποιεί τη θερμική αντίθεση και βελτιστοποιεί το αποτέλεσμα.

4. Για την συγκεκριμένη μελέτη, μια απλή ανάλυση κόστους-οφέλους θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον. Αυτή η εγκατάσταση επιστρέφει ετήσια έσοδα 470.000 ΕΥΡΩ. Υπολογίζεται ότι περίπου 150 πάνελ είναι σε πολύ άσχημη κατάσταση και θα πρέπει να αντικατασταθούν και περίπου 50 πάνελ παράγουν μικρότερη από την αναμενόμενη ενέργεια. Μια κατά προσέγγιση εκτίμηση της απώλειας χρημάτων είναι περίπου 14.000 ευρώ ετησίως. Υποθέτοντας ότι τα πλαίσια δεν είναι εντός εγγύηση, το κόστος για 150 ηλιακά πλαίσια 240Wp κοστίζουν περίπου 18.000 ευρώ.
5. Η ανάγκη για θερμική επιθεώρηση στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι υψηλή. Η συγκεκριμένη μελέτη μας έδειξε ότι το 4 ετών φωτοβολταϊκό πάρκο έχει ήδη υποστεί μεγάλη φθορά.
6. Η χρήση του eBee σε αυτές τις επιθεωρήσεις παρέχει πολλά οφέλη:
  - a. Η έγκαιρη ανίχνευση των σφαλμάτων
  - b. Ελαχιστοποιεί τα καταρτισμένα άτομα που χρειάζονται για να κάνουν την επιθεώρηση
  - c. Ελαχιστοποιεί την έκθεση σε κίνδυνο των εργαζομένων, ιδίως για τα συστήματα οροφής
  - d. Μπορεί να καλύψει μεγάλες περιοχές μέσα σε λίγα λεπτά
  - e. Μπορεί να παρέχει ακριβή θέση για περιπτώσεις που χρήζουν περαιτέρω ελέγχου εδάφους
  - f. Μπορεί να συνοψίσει το σύνολο της εγκατάστασης σε μία μόνο εικόνα