

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΨΥΞΗΣ  
ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ**

Υπό

ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ ΒΟΜΒΑ  
και  
ΣΠΥΡΙΔΩΝΑ ΔΙΑΜΑΝΤΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής , αναπληρωτής  
καθηγητής τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2015



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14024/1  
Ημερ. Εισ.: 07-03-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2015  
BOM

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Ερρίκος Σταπουντζής  
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Αναστάσιος Σταματέλλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ερρίκο Σταπουντζή, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, Καθηγητές κ. Νικόλαο Ανδρίτσο και κ. Αναστάσιο Σταματέλλο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλουμε επίσης θερμές ευχαριστίες στον διδάκτορα του τμήματος κ. Δημήτρη Τζιουρτζιούμη που μας βοήθησε με την λειτουργία της θερμικής κάμερας και μας υπέδειξε τον τρόπο χρήσης του λογισμικού της. Ευχαριστούμε όλους τους φίλους, φίλες και συγγενείς μας για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαστε ευγνώμονες στους γονείς μας για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Παρασκευάς Βόμβας,

Σπυρίδων Διαμαντής

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναλυτική μελέτη των θερμοκρασιών και των μεταβατικών φαινομένων σε πειραματική διάταξη πτερυγίου που λειτουργεί ως ψήκτρα μιας θερμαινόμενης επιφάνειας. Στα πειράματα έγινε χρήση θερμικής κάμερας (infrared) και του αντίστοιχου λογισμικού επεξεργασίας της εταιρείας. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την χρήση των θερμοστοιχείων της διάταξης με ειδικό πολύμετρο και έγινε χρήση προγραμμάτων για την διεξαγωγή δεδομένων και διαγραμμάτων θερμοκρασίας-χρόνου. Ακόμη έγινε μελέτη της συμπεριφοράς των θερμοκρασιών με την χρήση φουσητήρα (air jet), ο οποίος τοποθετήθηκε υπό διάφορες κλίσεις, που αποσκοπεί στην τοπική ψύξη του πτερυγίου. Από το πείραμα αυτό έγινε διεξαγωγή των δεδομένων των μετρήσεων και προέκυψαν βίντεο, στιγμιότυπα και διαγράμματα θερμοκρασίας. Τέλος έγινε απεικόνιση ροής καπνού παράλληλα στο πτερύγιο, στον οποίο προσέκρουε δέσμη φωτός από συσκευή λέιζερ, με καπνό προερχόμενο εκ καπνογόνου τοποθετημένου στη βάση του σε διάφορες θερμοκρασίες του πτερυγίου, πείραμα που αποσκοπεί στην μελέτη του είδους ροής του καπνού σε σχέση με την θερμοκρασία της πλάκας.

## **Abstract**

In this thesis, there is an in-depth study of the temperatures and the transitional phenomena in an experimental flap setup that functions as a cooler of a heated surface. During the experiments, an infrared camera was used with the aid of a processing software. Also, there were measurements using the thermocouples of the setup with a special multimeter and through the use of software, extraction of data and diagrams of temperature-time. Furthermore, there was a study of the behavior of temperatures with the use of an air-jet, which was placed in different angles, aiming in local refrigeration of the flap. Through this experiment, there was extraction of data of the measurements, leading to videos, snapshots, and diagrams of temperature. Finally, there was depiction of the flow of fumes in parallel to the flap, on which there was a collision of a beam of light through a laser device, with fume deriving from a smoke agent located in its groundwork in various temperatures of the flap, an experiment that leads to the study of the type of flow of the fumes in relation to the temperature of the plate.

## Πίνακας Αδιάστατων Αριθμών

- Αριθμός Reynolds (Re) : Ο αριθμός Re δίνει τον λόγο των δυνάμεων αδράνειας (κινητική ενέργεια) προς τις δυνάμεις τριβής.

$$\text{Τύπος : } Re = \frac{\rho \cdot u^2}{\eta \cdot u/l} = \frac{u \cdot l}{\nu}$$

- Αριθμός Prandtl (Pr) : Ο αριθμός Pr ο οποίος είναι φυσική ιδιότητα του ρευστού δίνεται από τον λόγο του κινηματικού ιξώδους προς τον συντελεστή θερμικής διαχυτότητας.

$$\text{Τύπος : } Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

- Αριθμός Nusselt (Nu) : Ο αριθμός Nu παριστάνει μία αδιάστατη κλίση της θερμοκρασίας στο τοίχωμα ή αλλιώς συγκρίνει την πραγματική κλίση του θερμοκρασιακού πεδίου μέσα στο ρευστό στην επιφάνεια επαφής με το τοίχωμα προς την κλίση της θερμοκρασίας σε ένα στρώμα πάχους.

$$\text{Τύπος : } Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \frac{q_w \cdot l}{\lambda \cdot \Delta\theta}$$

- Αριθμός Grashof (Gr) : Ο αριθμός Gr συγκρίνει την δύναμη άνωσης με την δύναμη τριβής και περιγράφει το πεδίο ροής όπου δεν εμφανίζεται κάποια χαρακτηριστική ταχύτητα.

$$\text{Τύπος : } Gr = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot g \cdot l \cdot \Delta\rho}{(\eta \cdot u \cdot l)^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$$

- Αριθμός Rayleigh (Ra) : Ο αριθμός Ra δίνει την αναλογία της μετάδοσης θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή προς τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή.

$$\text{Τύπος : } Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot \alpha}$$

- Αριθμός Biot (Bi) : Ο αριθμός Bi συγκρίνει τη συναγωγή στο ρευστό με την αγωγή στο στερεό σώμα και ο  $\lambda$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του στερεού.

$$\text{Τύπος : } Bi = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda}$$



## Πίνακας Συμβόλων

Θ:	Θερμοκρασία πτερυγίου
Θμ:	Μέση θερμοκρασία πτερυγίου
Θπ:	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
υ:	Ταχύτητα αέρα φουσητήρα
φ:	Γωνία πρόσκρουσης φουσητήρα στο πτερύγιο
A:	Εμβαδό πτερυγίου
Q:	Θερμοροή πτερυγίου
K:	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αέρα
δ:	Εύρος πτερυγίου (ύψος)

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 :</b> Εισαγωγή.....	11
<b>Κεφάλαιο 2 :</b> Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	13
2.1 Πτερύγια ψύξης.....	13
2.2 Αρχή λειτουργίας θερμικής κάμερας.....	24
<b>Κεφάλαιο 3 :</b> Κατασκευή πειραματικής διάταξης.....	28
3.1 Κατασκευή και τρόπος λειτουργίας του πτερυγίου.....	28
3.2 Συνδεσμολογία των μετρητικών οργάνων.....	33
<b>Κεφάλαιο 4 :</b> Πειραματική μεθοδολογία.....	37
4.1 1ο πείραμα, μετρήσεις με χρήση θερμικής κάμερας.....	37
4.2 2ο πείραμα, μετρήσεις με χρήση θερμοστοιχείων.....	40
4.3 3ο πείραμα, απεικόνιση ροής με χρήση καπνογόνου.....	42
4.4 Χρήση του λογισμικού της θερμικής κάμερας.....	43
<b>Κεφάλαιο 5 :</b> Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	50
5.1 Αποτελέσματα 1ου πειράματος (θερμική κάμερα).....	50
5.2 Αποτελέσματα 2ου πειράματος (θερμοστοιχεία).....	80
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμοκάμερας-θερμοστοιχείων.....	86
5.4 Αποτελέσματα 3ου πειράματος (καπνογόνο).....	87
5.5 Μελέτη αριθμού Nusselt στις μετρήσεις με φυσητήρα.....	93
<b>Κεφάλαιο 6 :</b> Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	99

6.1	Συμπεράσματα.....	99
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	101

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών σε αρκετές ηλεκτρονικές και θερμοηλεκτρικές συσκευές αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στη σωστή λειτουργία και στο χρονικό όριο της ζωής τους. Για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου απαιτείται κάποια μέθοδος αποβολής θερμότητας. Μια αξιόπιστη και σχετικά οικονομική λύση είναι η τοποθέτηση μίας ψήκτρας η οποία δεν αποτελείται από κινούμενα μέρη. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην αύξηση της αποβολής θερμότητας μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλότερων θερμοκρασιών στην συσκευή. Για την εκμετάλλευση της ελεύθερης επιφάνειας από την οποία θα απάγεται θερμότητα είναι απαραίτητη η προσθήκη πτερυγίων των οποίων η απόδοση εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους, τις διαστάσεις τους αλλά και την σωστή τοποθέτησή τους στην επιφάνεια.

Στην παρούσα μελέτη γίνεται λεπτομερειακή ανάλυση των φαινομένων που αναπτύσσονται πάνω σε ένα κατακόρυφο ορθογωνικό πτερύγιο ψύξης. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη πτερυγίου η οποία κατασκευάστηκε από τον πρώην φοιτητή του τμήματος Εμμανουήλ Αλεξανδρόγλου το 2004. Επομένως η διπλωματική εργασία αποτελεί μία συνέχεια της δικιάς του εργασίας. Εδώ όμως, πέρα από την χρήση των θερμοστοιχείων, έγιναν μετρήσεις με θερμική κάμερα (infrared camera) απ' όπου προκύπτουν βίντεο με την απεικόνιση των θερμοκρασιών στην πειραματική διάταξη. Επιπλέον έγινε μελέτη των μεταβατικών φαινομένων πάνω στο πτερύγιο αφού πλέον λαμβάναμε υπ' όψιν μας την συνιστώσα του χρόνου. Επίσης χρησιμοποιήθηκε φουσητήρας (air jet) για την διεκπεραίωση πειραμάτων με τοπική ψύξη από δέσμη αέρα. Ακόμα έγινε απεικόνιση ροής καπνού προερχόμενου από καπνογόνο στην επιφάνεια του πτερυγίου σε

διαφορετικές θερμοκρασίες μέσω βιντεοκάμερας.

Από τα παραπάνω πειράματα προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν το προαναφερθέν φαινόμενο.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην βιβλιογραφική ανασκόπηση θα γίνει αναφορά σε διάφορες δημοσιεύσεις που αφορούν τα πτερύγια ψύξης αλλά και σε τεχνικές βελτιστοποίησής τους στο πέρασμα των χρόνων καθώς και στην θεωρητική λειτουργία των πτερυγίων. Τέλος θα γίνει αναφορά σε βιβλιογραφία που αφορά την θερμική κάμερα και τον τρόπο λειτουργίας της.

### 2.1 Πτερύγια ψύξης

Τα πτερύγια χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η αύξηση του ρυθμού Μετάδοσης Θερμότητας σε μία επιφάνεια που ψύχεται με συναγωγή από ένα ρευστό. Το πτερύγιο αποτελεί περίπτωση σύζευξης αγωγής και συναγωγής: Η θερμότητα μεταφέρεται από το βασικό σώμα ( πλάκα κ.λ.π.) με αγωγή στο πτερύγιο και αποδίδεται με συναγωγή στο ρευστό.

Ο W. Elenbaas (1942) ασχολήθηκε εκτεταμένα με κανάλια και παράλληλες πλάκες σε πειραματικό και εμπειρικό στάδιο. Τα πειραματικά του αποτελέσματα για τετράγωνα κάθετες πλάκες διάχυσης θερμότητας στο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την σύγκριση νεότερων μελετών που είχαν ως αντικείμενο τις συστοιχίες κάθετων πτερυγίων.

Ο Ostrach (1952) μελέτησε την πλήρως ανεπτυγμένη ροή του ρευστού μεταξύ καθέτων πλακών. Παρατηρήθηκε ότι η παράλληλη διάσταση στη ροή δεν επηρεάζεται καθώς η ροή δεν αλλάζει στην κατεύθυνση αυτή.

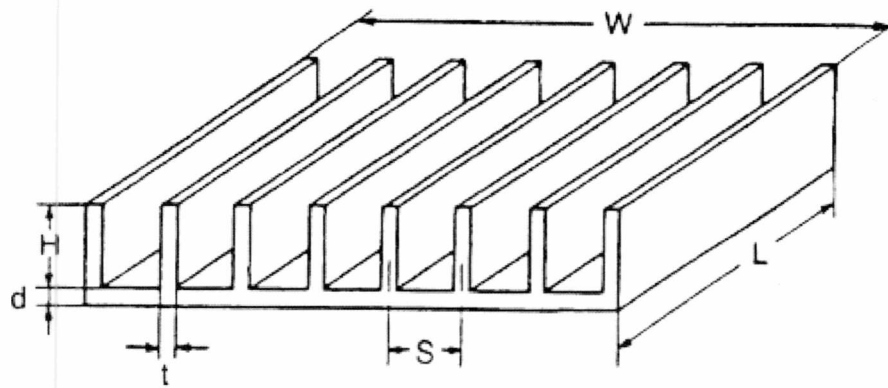
Μία θεωρητική ανάλυση της μετάδοσης θερμότητας και ανάπτυξης ροής, σε ελεύθερη συναγωγή, μεταξύ θερμαινόμενων πλακών αποτέλεσε το αντικείμενο μελέτης για τους Bodoia και Osterle (1962). Το αποτέλεσμα ενός μελέτης ήταν πως

είναι πρακτικά αδύνατο να αναπτυχθεί πλήρως η ροή σε ρευστά με πολύ μεγάλο ιξώδες.

Επίσης ο Welling μελέτησε και συμπέρανε ότι ένα κάθετο παραλληλόγραμμο πτερύγιο και μία κάθετη πλάκα με ίδια χαρακτηριστικά κάθετου μήκους και επιφάνειας δεν θα έχει τόσο μεγάλους συντελεστές ελεύθερης συναγωγής όσο η επίπεδη πλάκα. Έτσι οι αριθμοί Nusselt που προκύπτουν για τα πτερύγια είναι μικρότεροι από αυτούς των κάθετων πλακών αλλά μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους των παράλληλων πλακών ή των τετράγωνων αγωγών.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα στο οποίο κατέληξε είναι ότι υπάρχει ένα βέλτιστο ύψος πτερυγίου για κάθε κανάλι πτερυγίων και πως οποιαδήποτε τιμή μικρότερη ή μεγαλύτερη αποτελεί μείωση στην μετάδοση θερμότητας από ελεύθερη συναγωγή. Ακόμη παρατηρήθηκε πως η αγωγιμότητα του πτερυγίου αυξάνει σχεδόν αναλογικά με την αύξηση του λόγου του ύψους του πτερυγίου προς το πλάτος του καναλιού των πτερυγίων.

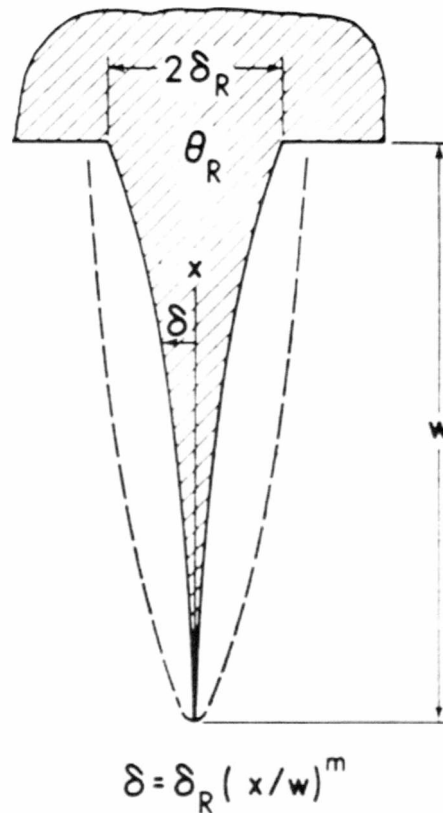
Οι Harahap και McManus (1967) βασισμένοι στις μελέτες των Welling και Wooldridge ασχολήθηκαν με πτερύγια τοποθετημένα οριζόντια. Έτσι συγκρίνοντας δύο σειρές πτερυγίων με ίδια χαρακτηριστικά ύψους και διάκενου πτερυγίων αλλά με διαφορετικό μήκος, παρατήρησαν πως εκείνα που είχαν το μισό μήκος από τα άλλα απέκτησαν μεγαλύτερο μέσο όρο συντελεστών συναγωγής. Όμως το περιορισμένο εύρος πειραματικών στοιχείων αποτέλεσε τροχοπέδη για την εύρεση ενός κριτηρίου για την βελτιστοποίηση των πτερυγίων.



Σχήμα 2.1

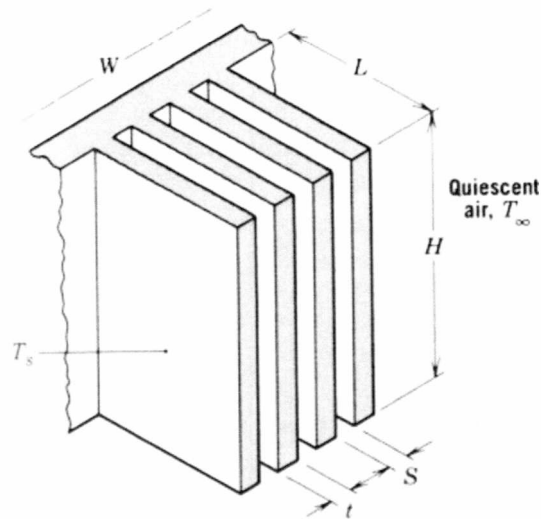
Το 1968 οι Lock και Gunn διαπίστωσαν ότι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας από μια επιφάνεια βυθισμένη σε ένα ήρεμο ρευστό αυξάνεται αν τοποθετηθούν πτερύγια. Η μελέτη τους αναφέρεται στην αγωγή και ελεύθερη συναγωγή από ένα λεπταίνον πτερύγιο τοποθετημένο κάθετα με φορά προς τα κάτω. Το προφίλ του ακολουθεί υπερβολικό χαρακτήρα και ο λόγος λεπτότητας (ύψος προς πάχος) διατηρείται μεγάλος. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους έδειξαν πως τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης θερμότητας του προβλήματος επηρεάζονται από μια αδιάστατη μεταβλητή που περιλαμβάνει τους λόγους αγωγιμότητας και λεπτότητας καθώς και έναν μεταβαλλόμενο Prandtl-Grashof αριθμό. Διαπιστώθηκε επίσης πως η μεταβολή του αριθμού Prandtl επηρέασε ελάχιστα το φαινόμενο.





Σχήμα 2.2

Ένα θέμα που απασχόλησε τους Jones και Smith (1970) ήταν η βέλτιστη τοποθέτηση (διάκενο) των πτερυγίων σε οριζόντια επιφάνεια, σταθερού εμβαδού, για μετάδοση θερμότητας από ελεύθερη συναγωγή. Παρατηρήθηκε πως όσο μικραίνει η μεταξύ απόσταση των πτερυγίων τόσο αυξάνει ο αριθμός τους και ανάλογα αυξάνει και η μετάδοση θερμότητας. Όμως μετά από ένα σημείο το πολύ μικρό διάκενο εμποδίζει την ροή του ρευστού ανάμεσα στα πτερύγια τα οποία αρχίζουν να δυσλειτουργούν. Το συμπέρασμα της μελέτης τους ήταν πως για την μέγιστη μετάδοση θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, η απόσταση μεταξύ των πτερυγίων είναι η πρωταρχική γεωμετρική μεταβλητή.



Σχήμα 2.3

Οι Levy και Shaw (1975) ασχολήθηκαν με την βελτιστοποίηση όσον αφορά το διάκενο μεταξύ των πτερυγίων. Η συγκεκριμένη όμως μελέτη διαφέρει από τις προηγούμενες καθότι περιορίστηκαν μόνο σε δύο πτερύγια τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης θερμότητας από συναγωγή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μόνο μια θέση των πτερυγίων κατά την οποία οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πάνω σε αυτήν ελαχιστοποιούνται. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν πως η βέλτιστη τιμή είναι :

$$400 < \frac{b}{L} Gr \cdot Pr < 800$$

,όπου b=διάκενο πτερυγίων και L=ύψος πτερυγίου.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι για τον αέρα και δεν μπορούν να εφαρμοστούν ποιοτικά για υγρά μέταλλα.

Ένα θέμα το οποίο δεν είχε μελετηθεί μέχρι τότε ήταν το πάχος πτερυγίου για

την βέλτιστη ελεύθερη συναγωγή. Ο Bar-Cohen (1979) πραγματοποίησε μια μελέτη με θέμα το βέλτιστο πάχος ενός πτερυγίου με δεδομένη και σταθερή διάχυση θερμότητας. Η ικανότητα αποβολής θερμότητας από ένα μονό, παραλληλόγραμμο, ελαχίστου υλικού πτερύγιο το οποίο υποβάλλεται σε έναν σταθερό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας εκφράζεται ως:

$$\frac{q_{lm}}{L} = 1.258(hk)^{1/2} \delta^{1/2} \theta_0$$

όπου :  $q_{lm}$ =αποβολή θερμότητας μονού πτερυγίου ελαχίστου υλικού,

$L$ =μήκος πτερυγίου,

$h$ =συντελεστής συναγωγής μετάδοσης θερμότητας,

$k$ = θερμική αγωγή υλικού του πτερυγίου,

$\delta$ =πάχος πτερυγίου,

$\theta_0$ =διαφορά θερμοκρασίας βάσης πτερυγίου και περιβάλλοντος.

Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας επιτυγχάνεται σε μία σχέση του πλάτους του πτερυγίου συναρτήσει του πάχους του. Η σχέση αυτή είναι :

$$b_{lm} = 1.4192 \left( \frac{k}{2h} \right)^{1/2} \delta^{1/2}$$

όπου :  $b_{lm}$ =πλάτος πτερυγίου ελαχίστου υλικού,

$h$ =συντελεστής συναγωγής μετάδοσης θερμότητας,

$k$ = θερμική αγωγή υλικού του πτερυγίου,

$\delta$ =πάχος πτερυγίου.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει και ο τύπος για το βέλτιστο πλάτος :

$$b_{opt} = 1.7 \left( \frac{kP}{k_a} \right)^{1/2} \delta^{1/2}$$

Όπου : P=παράμετρος σειράς πτερυγίων,

$k_a$ =θερμική αγωγιμότητα του περιβάλλοντος αέρα,

$k$ = θερμική αγωγή υλικού του πτερυγίου,

$\delta$ =πάχος πτερυγίου.

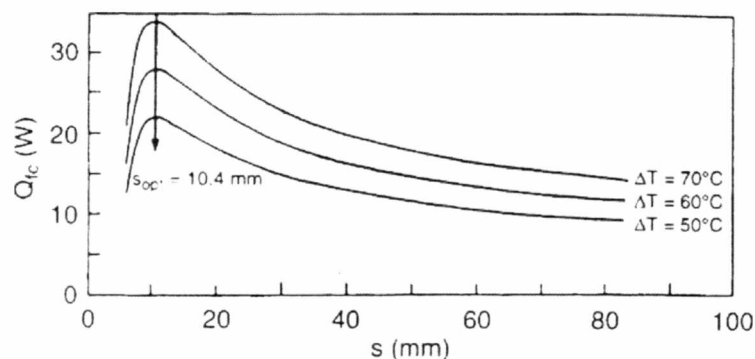
Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν πως η θερμική απόδοση πτερυγίου ελαχίστου υλικού αυξάνει όταν αυξάνεται το πάχος του πτερυγίου. Πιο συγκεκριμένα για τον αέρα η τιμή αυτή πλησιάζει την τιμή του βέλτιστου διάκενου.

Ένα σημαντικό θέμα που μελετήθηκε αργότερα από τους Raithby και Hollands (1994) ήταν η χρησιμοποίηση πτερυγίων τριγωνικής διατομής και όχι παραλληλόγραμμης. Στα πειράματά τους ασχολήθηκαν με πτερύγια τοποθετημένα οριζόντια σε θερμαινόμενη πλάκα κάθετη. Οι περιπτώσεις που εξέτασαν αφορούσαν την πυκνή, μέτρια και αραιή τοποθέτηση των πτερυγίων σε πλάκα προκαθορισμένων διαστάσεων. Στα αποτελέσματά τους φάνηκε πως οι τιμές του αριθμού Nu που μέτρησαν σχεδόν συμπίπτει με την θεωρητική τιμή για αριθμό  $Ra \geq 4000$ , καθώς όταν ο αριθμός  $Ra \rightarrow 0$ , ο αριθμός  $Nu \rightarrow Nu_{cond}$ , όπου  $Nu_{cond}$  είναι η οριακή τιμή για απώλεια θερμότητας από αγωγή στον περιβάλλοντα αέρα. Τέλος ο αριθμός Nusselt για πτερύγια τοποθετημένα οριζόντια ήταν αρκετά μικρότερος από την περίπτωση που τα πτερύγια ήταν τοποθετημένα κάθετα στην ίδια κάθετη πλάκα.

Μία μελέτη όσον αφορά τη βελτιστοποίηση για το διάκενο μεταξύ των

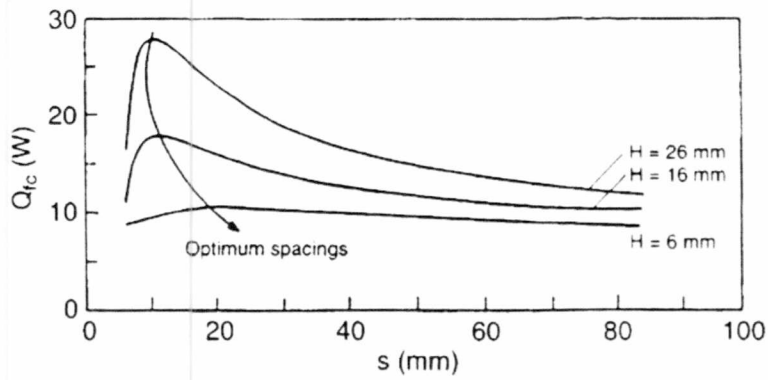
περυγίων πραγματοποίησαν οι Yuncu και Anbar (1998). Ο κύριος σκοπός της μελέτης τους ήταν η πρόβλεψη του βέλτιστου διάκενου για μέγιστη μεταφορά θερμότητας συναρτήσει του ύψους του περυγίου και της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ βάσης και περιβάλλοντος. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν πως η μετάδοση θερμότητας από ελεύθερη συναγωγή εξαρτάται από το διάκενο των περυγίων, το ύψος τους και την διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον. Η μετάδοση θερμότητας αυξάνει ανάλογα με την διαφορά θερμοκρασίας. Τέλος υπάρχει μία βέλτιστη τιμή του διάκενου για κάθε διαφορετικό ύψος περυγίου και κατά την αύξηση ή την μείωση της τιμής αυτής υπάρχει μείωση της μετάδοσης θερμότητας.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους.



Μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας συναρτήσει του διάκενου των περυγίων σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες.

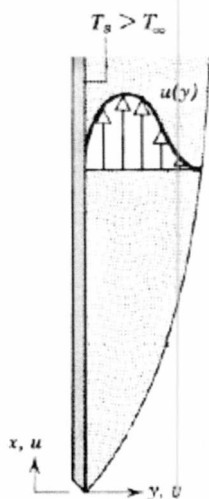
Σχήμα 2.4



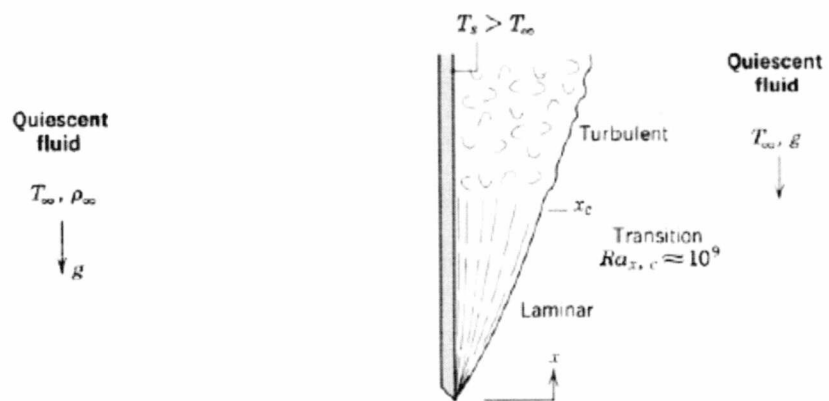
Μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης θερμότητας συναρτήσει του διάκενου των πτερυγίων σε τρία διαφορετικά ύψη.

Σχήμα 2.5

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν κάποια στοιχεία που περιγράφουν από θεωρητική πλευρά την ανάπτυξη του θερμικού οριακού στρώματος γύρω από το πτερύγιο. Τα στοιχεία αυτά αφορούν περιπτώσεις που θα μελετήσουμε. Στα δύο παρακάτω σχήματα παρατηρείται η ανάπτυξη της ταχύτητας στο θερμικό οριακό στρώμα και φαίνεται επίσης πως αλλάζει η ροή από στρωτή σε τυρβώδη αντίστοιχα.

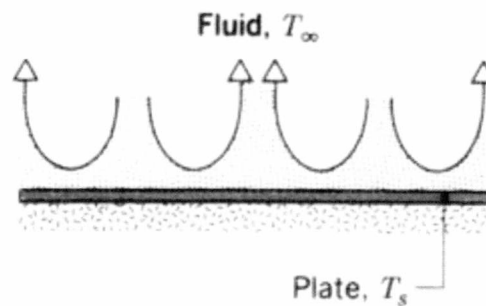


Σχήμα 2.6



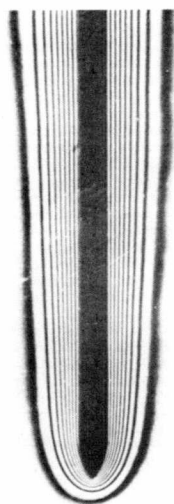
Σχήμα 2.7

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται πάνω από επίπεδη θερμαινόμενη επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει κάποιο σταθερό οριακό στρώμα καθώς η συναγωγή είναι ελεύθερη και τα θερμά τμήματα εκχέονται προς τα άνω στην κάθετη διεύθυνση. Η απεικόνιση του θερμοκρασιακού πεδίου παριστάνεται σχηματικά κατά αυτόν τον τρόπο για την πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου. Στην πραγματικότητα η το θερμοκρασιακό πεδίο είναι πιο ταραχώδες.



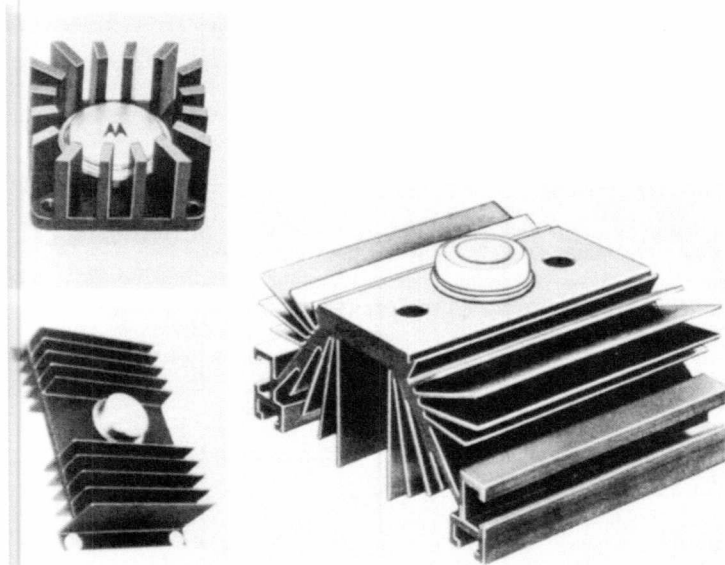
Σχήμα 2.8

Τέλος στο επόμενο σχήμα έχει φωτογραφηθεί το ανεπτυγμένο θερμικό οριακό στρώμα γύρω από ένα πτερύγιο ψύξης. Παρατηρούνται οι ισοϋψείς καμπύλες των θερμοκρασιών καθώς και η αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος κατά την κίνηση προς τα άνω.



**Σχήμα 2.9**

Παρακάτω φαίνεται η εξέλιξη των επίπεδων πλακών και των πτερυγίων σε ολοκληρωμένα συστήματα ψύξης.



**Σχήμα 2.10**

Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται ψήκτρες και τοποθετούνται κυρίως σε επεξεργαστές και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές που εμφανίζουν υψηλές θερμοκρασίες.



## 2.2 Αρχή λειτουργίας θερμικής κάμερας

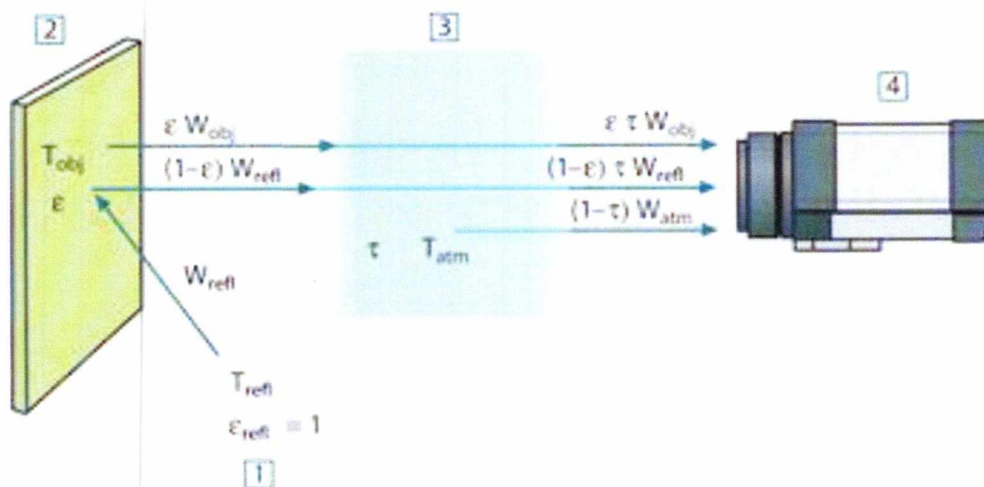
Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε έγινε χρήση θερμικής κάμερας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περυγίου. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει το περύγιο.

Θερμική ακτινοβολία λέγεται η μετάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος ή τη συχνότητά τους, όπου η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χωρίζεται τυχαία σε έναν αριθμό περιοχών μήκους κύματος που λέγονται μπάντες και διαχωρίζονται από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να παράξουν και να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία. Δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στην ακτινοβολία στις διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όλες καθορίζονται από τους ίδιους νόμους κι οι μόνες διαφορές είναι οι διαφορές στα μήκη κύματος.

Η θερμογραφία κάνει χρήση της υπέρυθρης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η ακτινοβολία στην περιοχή αυτή που αφορά μήκη κύματος 0.1 έως 100  $\mu\text{m}$  όταν πέσει πάνω σε ένα σώμα, το θερμαίνει και για αυτό λέγεται θερμική ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, επειδή η ακτινοβολία στην περιοχή μήκους κύματος από 0.38 έως 0.76  $\mu\text{m}$  ερεθίζει το οπτικό νεύρο, μπορούμε να δούμε τη θερμική ακτινοβολία σε αυτή τη ζώνη σαν φως. Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν, εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω σε ένα σώμα, ένα κλάσμα απορροφάται, ένα άλλο κλάσμα ανακλάται, και το υπόλοιπο μεταδίδεται μέσα στο σώμα. Τα περισσότερα στερεά υλικά απορροφούν πρακτικά όλη την ακτινοβολία σε ένα πολύ λεπτό εξωτερικό στρώμα τους, πάχους μικρότερου του 1 mm.

Η θερμική κάμερα λαμβάνει την ακτινοβολία όχι μόνο από το αντικείμενο που μας ενδιαφέρει. Συλλέγει επίσης την ακτινοβολία από το περιβάλλον μέσω της ανάκλασης από το αντικείμενο. Οι συνεισφορές αυτές της ακτινοβολίας μπορούν να εξασθενήσουν ως ένα βαθμό από την ατμόσφαιρα. Σε αυτό το σημείο όμως έρχεται να προστεθεί μια ακόμη συνεισφορά ακτινοβολίας, αυτή της ατμόσφαιρας.

Η περιγραφή που θα ακολουθήσει, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω, είναι μια αρκετά καλή περιγραφή πραγματικών συνθηκών. Αυτά που αγνοούνται είναι για παράδειγμα η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας και σκόρπιες ακτινοβολίες έξω από το πεδίο θέασης. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να κάνουμε τις μετρήσεις μας, εξασφαλίζοντας χαμηλή στάθμη φωτισμού. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει βασίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.11

Θεωρούμε ότι η λαμβάνουσα θερμική ακτινοβολία  $W$  από ένα σώμα θερμοκρασίας  $T_{source}$  σε μια κοντινή απόσταση, παράγει μια ισχύ εξόδου  $U_{source}$  που είναι ανάλογη της ισχύς εισόδου.

$$U_{source} = C \cdot W_{source}$$

με  $C$  μια σταθερά.

Η αντίστοιχη θερμική ακτινοβολία ενός σώματος θα είναι τότε:  $\varepsilon \cdot W_{source}$ .

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να συγκεντρώσουμε τους τρεις όρους της συλλεγόμενης ακτινοβολίας.

- Εκπομπή από το αντικείμενο =  $\varepsilon \cdot \tau \cdot W_{object}$ , όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής εκπομπής,  $\tau$  ο συντελεστής διάδοσης της ατμόσφαιρας και  $T_{object}$  η θερμοκρασία του αντικειμένου.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία από εξωτερικές πηγές =  $(1-\varepsilon) \cdot W_{refl}$ , όπου  $(1-\varepsilon)$  ο συντελεστής ανάκλασης του αντικειμένου. Οι εξωτερικές πηγές έχουν θερμοκρασία  $T_{refl}$ .
- Εκπομπή από τη ατμόσφαιρα =  $(1-\tau) \cdot \tau \cdot W_{atm}$ , όπου  $(1-\tau)$  ο συντελεστής εκπομπής της ατμόσφαιρας και  $T_{atm}$  η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας.

Κατά συνέπεια η συνολική λαμβανόμενη ακτινοβολία μπορεί να γραφεί:

$$U_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot U_{obj} + (1-\varepsilon) \cdot \tau \cdot U_{refl} + (1-\tau) \cdot U_{atm} \Leftrightarrow$$

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{atm} \quad , \text{ όπου}$$

$U_{obj}$ : η υπολογιζόμενη ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $T_{obj}$ , η οποία μπορεί να μετατραπεί απευθείας στη ζητούμενη θερμοκρασία του αντικειμένου.

- $U_{tot}$ : η πραγματική μετρούμενη από τη θερμοκάμερα ισχύς εξόδου
- $U_{ref}$ : η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία  $T_{ref}$  σύμφωνα με τη διακρίβωση
- $U_{atm}$ : η θεωρητική ισχύς εξόδου για ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία  $T_{atm}$  σύμφωνα με τη διακρίβωση

Συνοψίζοντας, τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης για τον υπολογισμό είναι:

- ❖ ο συντελεστής εκπομπής του αντικειμένου  $\epsilon$
- ❖ η σχετική υγρασία
- ❖ η ατμοσφαιρική θερμοκρασία
- ❖ η απόσταση του αντικειμένου
- ❖ η θερμοκρασία των αντικειμένων στο άμεσο περιβάλλον

## Κεφάλαιο 3 Κατασκευή Πειραματικής Διάταξης

### 3.1 Κατασκευή και τρόπος λειτουργίας του πτερυγίου

Η πειραματική διάταξη αφορά ένα σύστημα θέρμανσης πλάκας στην οποία είναι κάθετα τοποθετημένο ένα πτερύγιο αποβολής θερμότητας. Η κατασκευή και η συναρμολόγηση του συστήματος έγινε στον μεγαλύτερο βαθμό από τον πρώην φοιτητή του τμήματος Εμμανουήλ Αλεξανδρόγλου για την διπλωματική του εργασία το 2004.

Για την κατασκευή της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν δύο πλάκες αλουμινίου. Το ένα τεμάχιο ήταν διαστάσεων 1000\*510\*10 χιλιοστών και το άλλο τεμάχιο διαστάσεων 2000\*1000\*5 χιλιοστών. Η πλάκα διαστάσεων 1000\*510\*10 χωρίστηκε σε τρία ίσα κομμάτια των 333\*510\*10 χιλιοστών και η πλάκα διαστάσεων 2000\*1000\*5 σε κομμάτια των 200\*510\*5 χιλιοστών και των 333\*510\*5 χιλιοστών. Η κοπή των παραπάνω τεμαχίων έγινε με υδραυλικό « ψαλίδι ». Συνέπεια του τρόπου κοπής ήταν δημιουργία αιχμών στις ακμές των τεμαχίων με αποτέλεσμα την ανάγκη για την εκκαθάριση τους με τριβείο χειρός (σφυριδόπανο).

Δύο από τις τρεις πλάκες αλουμινίου πάχους 10 χιλιοστών χρησιμοποιήθηκαν για την συγκράτηση των αντιστάσεων θέρμανσης. Στις πλάκες αυτές δημιουργήθηκαν καταρχήν 4 οπές διαμέτρου 6.5 χιλιοστών για την μεταξύ τους συγκράτηση και κατά συνέπεια την συγκράτηση των αντιστάσεων. Έπειτα δημιουργήθηκαν 18 οπές διαμέτρου επίσης 6.5 χιλιοστών για την περαιτέρω συναρμολόγηση της διάταξης.

Η τρίτη πλάκα πάχους 10 χιλιοστών χρησιμοποιήθηκε για την στήριξη του πτερυγίου. Στην συγκεκριμένη πλάκα δημιουργήθηκαν 18 οπές ίδιας διαμέτρου και θέσης με τις πλάκες αντιστάσεων με μια μικρή διαφοροποίηση, το ένα μέρος των

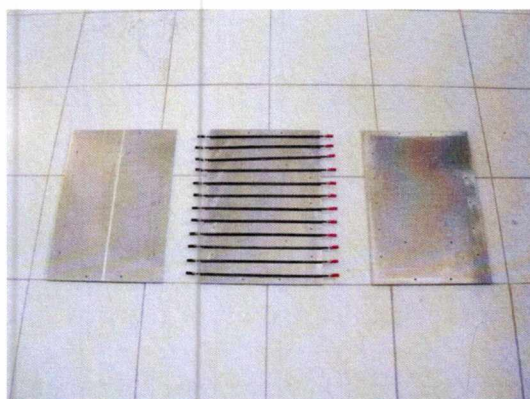
οπών διευρύνθηκε στα 12 χιλιοστά για την υποδοχή κοχλιών με φρεζάτη κεφαλή.

Επίσης για την στερέωση του πτερυγίου δημιουργήθηκε σε φρέζα κανάλι πλάτους 5 χιλιοστών και βάθους 2.5 χιλιοστών. Η θέση του είναι στη μέση της πλάκας κατά τον διαμήκη άξονα αυτής.

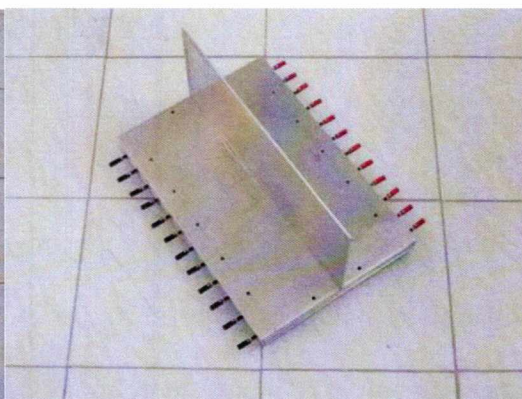
Μία από τις πλάκες αλουμινίου διαστάσεων 200\*510\* 5 χιλιοστών αποτελεί το πτερύγιο ψύξης. Στην συγκεκριμένη πλάκα δημιουργήθηκαν 63 οπές διαμέτρου 0.8 χιλιοστών για την τοποθέτηση των θερμοστοιχείων.

Το πτερύγιο τοποθετήθηκε στο κανάλι της πλάκας για να σταθεροποιηθεί και να καθοριστεί επακριβώς η θέση του πάνω σε αυτήν. Η πλάκα πτερυγίου συγκολλήθηκε με το πτερύγιο με κόλληση τύπου Argon.

Ο αριθμός των αντιστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν είναι δώδεκα. Αρχικά στερεώνονται οι αντιστάσεις με την μέθοδο της θερμοκόλλησης ούτως ώστε να βρεθεί με ακρίβεια η θέση τους πάνω στη πλάκα. Έπειτα προσαρμόζεται η δεύτερη πλάκα ακριβώς από πάνω από τις αντιστάσεις και γίνεται σύσφιξη των τεσσάρων κοχλιών που συνδέουν τις δύο πλάκες μεταξύ τους. Κατά το στάδιο αυτό έχει πλέον δημιουργηθεί μια νέα πλάκα , η πλάκα θέρμανσης, η οποία έχει την δυνατότητα να δεχθεί πτερύγιο ψύξης.

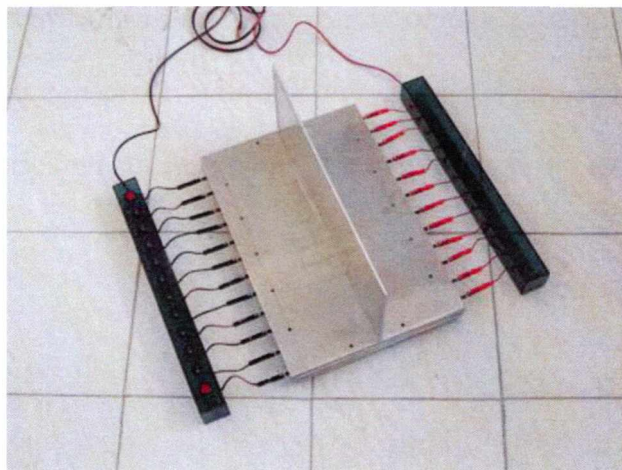


**Σχήμα 3.1**



**Σχήμα 3.2**

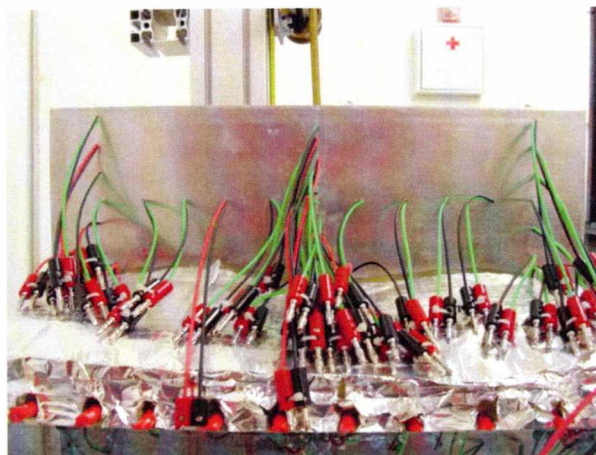
Για την ασφάλεια και την ομαλή λειτουργία του συστήματος θέρμανσης τοποθετήθηκαν μία σειρά από 12 διακόπτες που θέτουν τις αντιστάσεις σε λειτουργία. Η σύνδεση των αντιστάσεων είναι σε σειρά και η συνολική τους ωμική αντίσταση είναι 3 Ohm. Για την αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος, τους οι συνδέσεις (κολλήσεις) και οι διακόπτες τοποθετήθηκαν σε δύο πάνελ κατασκευασμένα από Plexiglas. Τα πάνελ αποτελούνται από έξι έδρες, οι οποίες κολλήθηκαν με διάλυμα χλωροφορμίου και οι συνολικές τους διαστάσεις είναι 50\*50\*500 χιλιοστά. Στο ένα εκ των δύο πάνελ δημιουργήθηκαν οπές διαμέτρου 21 χιλιοστών για να φιλοξενηθούν οι διακόπτες. Όλα τα καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν για τους συνδεσμολογίες είναι 2\*1.5 καθώς θα διαρρέονται από υψηλής εντάσεως ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, τα πάνελ συνδεθήκαν με τους αντιστάσεις με βύσματα για την εύκολη σύνδεση και αποσύνδεσή τους όποτε κρίνεται αυτό απαραίτητο.



**Σχήμα 3.3**

Στο περύγιο κολληθήκαν θερμοστοιχεία που κατασκευάστηκαν και είναι τύπου K, δηλαδή πρόκειται για ένα ζεύγος καλωδίων από διαφορετικό υλικό των οποίων οι δύο άκρες είναι κολλημένες μεταξύ τους και οι άλλες ελεύθερες συνδέονται με το κατάλληλο όργανο μέτρησης. Η θερμοκρασία που θέλουμε να μετρήσουμε,

τοποθετώντας την άκρη του ζεύγους στο σημείο της μέτρησης , μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ,λόγω της διαφορετικότητας των υλικών, που αναγνωρίζεται από το μετρητικό όργανο και ισοδυναμεί στην αντίστοιχη θερμοκρασία.



**Σχήμα 3.4**

Ένας σημαντικός παράγοντας για να γίνουν οι μετρήσεις σωστά είναι η μόνωση της διάταξης έτσι ώστε η προσδιδόμενη θερμότητα να απάγεται μόνο από το πτερυγίο. Για τον λόγο αυτό έγινε μόνωση της διάταξης περιμετρικά καθώς και στις ελεύθερες επιφάνειες των πλακών αντιστάσεων και του πτερυγίου, άνω και κάτω. Η μόνωση δημιουργήθηκε από το μονωτικό υλικό, υαλοβάμβακα, σε πάχος 50 χιλιοστών. Όλα τα ανοίγματα και οι ακμές που δημιουργήθηκαν κατά το στάδιο της μόνωσης καλύφθηκαν με αλουμινοταινία.

Για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση στη θερμική κάμερα, το πτερυγίο ψύξης βάρθηκε με πυρίμαχη μαύρη ματ μπογιά η οποία αναμίχτηκε με ψιλή άμμο για τραχύτερη επιφάνεια. Αποτέλεσμα ήταν η μείωση της αντανάκλασης που προκαλούσε η λεία επιφάνεια του πτερυγίου και είχε ως συνέπεια την αλλοίωση της εικόνας στην θερμική κάμερα.

Για την θέρμανση του πτερυγίου η πειραματική διάταξη συνδέθηκε με τροφοδοτικό, το οποίο ρυθμίστηκε σε παροχή τάσης 30 Volt. Για την ανάπτυξη της



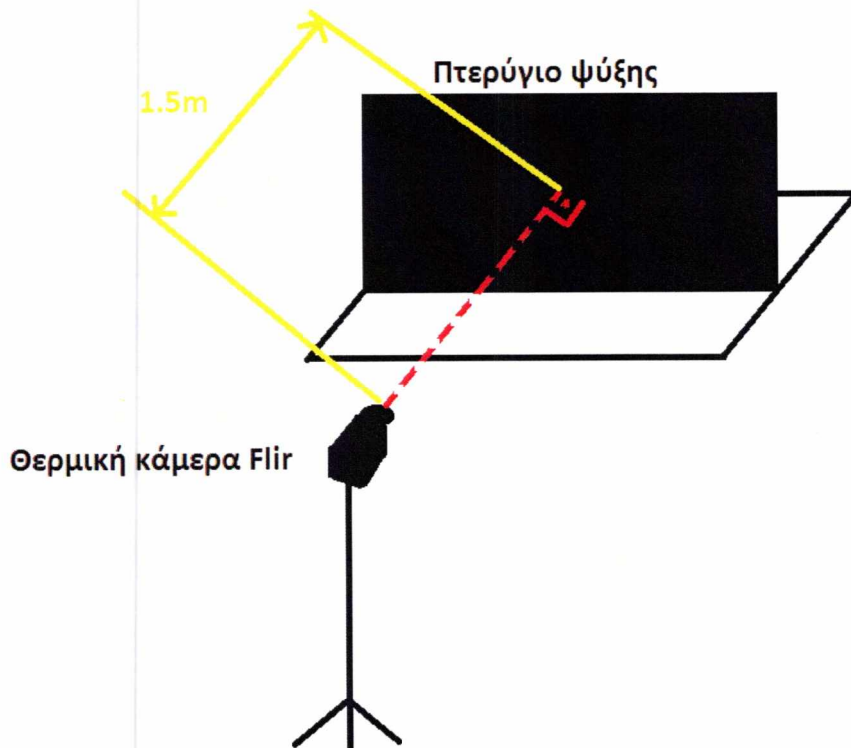
μέγιστης θερμοκρασίας ήταν απαραίτητη η τροφοδοσία της διάταξης για μεγάλο χρονικό διάστημα, διάρκειας περίπου 10 ωρών. Ο λόγος που επιλέχθηκε παροχή 30 Volt και είχε ως αποτέλεσμα την αργή θέρμανση του συστήματος ήταν για την ασφαλή λειτουργία της πειραματικής διάταξης αλλά και για την αποφυγή υπερθέρμανσης του τροφοδοτικού. Όλα τα πειράματα έγιναν με αυτήν την παροχή.



**Σχήμα 3.5**

### 3.2 Συνδεσμολογία των μετρητικών οργάνων

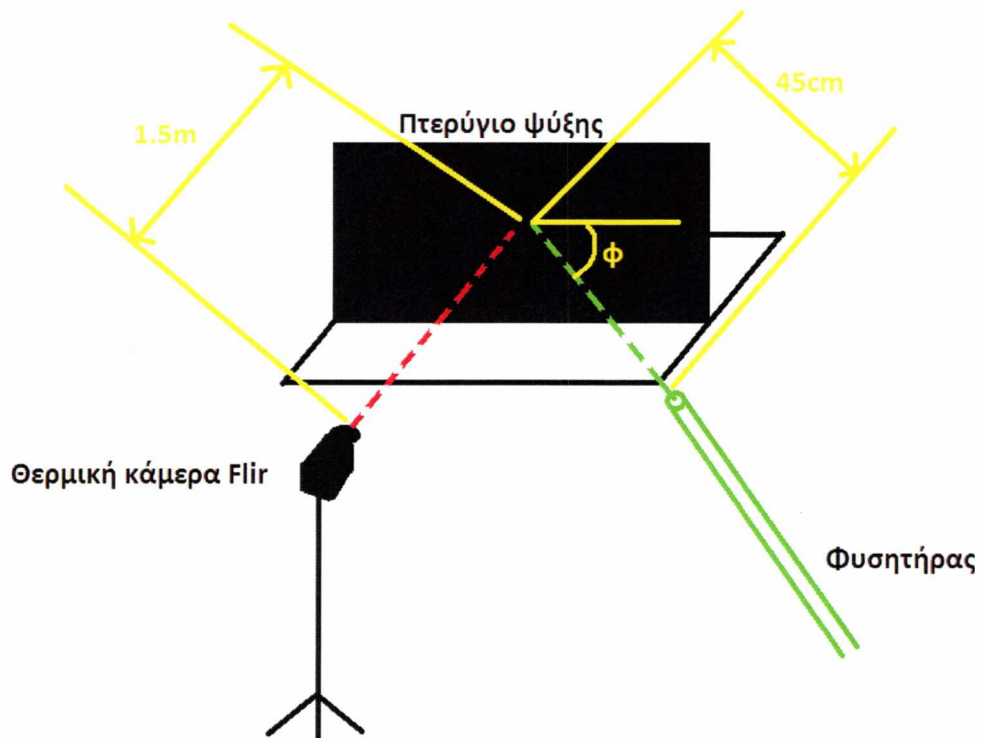
Η θερμική κάμερα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν της εταιρίας Flir. Η κάμερα στήθηκε πάνω σε τρίποδο, σε απόσταση 1.5 μέτρα από το πτερύγιο και η γωνία λήψης της ήταν κάθετη στο πτερύγιο. Η κάμερα συνδέθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο ήταν εγκατεστημένο το πρόγραμμα της Flir και έγινε η αποθήκευση, η προβολή και η επεξεργασία των εικόνων και των βίντεο που ελήφθησαν. Η συνδεσμολογία φαίνεται περιγραφικά στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.6

Επίσης διεξήχθη πείραμα στο οποίο έγινε χρήση φουσητήρα αέρος (air jet). Ο φουσητήρας προσέδιδε δέσμη αέρος ταχύτητας 34.2 m/s στο πτερύγιο με σκοπό την τοπική ψύξη του. Η διάμετρος του ακροφύσιου του φουσητήρα ήταν 2.5 χιλιοστά του μέτρου, και η απόστασή του από το κέντρο του πτερυγίου ήταν 45cm. Στο πείραμα

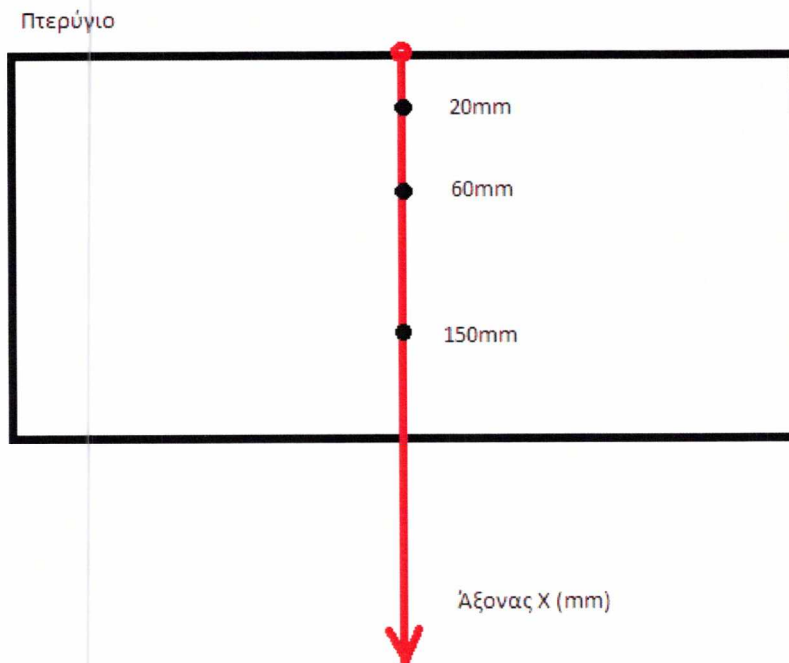
αυτό έγιναν μετρήσεις με την θερμική κάμερα σε διάφορες γωνίες της δέσμης αέρος από το κέντρο του πτερυγίου οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε περιγραφικά την συνδεσμολογία πτερυγίου-κάμερας-φουσητήρα.



Σχήμα 3.7

Στο επόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας στο κέντρο του πτερυγίου όσον αφορά τον οριζόντιό του άξονα, αλλά σε τρία διαφορετικά ύψη, με τη χρήση θερμοστοιχείων τα οποία συνδέθηκαν σε πολύμετρο της εταιρίας Protek αλλά και μεταγωγέα/ενισχυτή Juno. Τα δεδομένα συλλέχτηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω προγράμματος PC Labview. Σκοπός του παραπάνω πειράματος είναι η μελέτη του ρυθμού αύξησης και ελάττωσης της θερμοκρασίας του πτερυγίου από την οποία προκύπτουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου για κάθε ένα από τα ζεύγη θερμοστοιχείων στα

διάφορα ύψη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα ζεύγη θερμοστοιχείων που επιλέχθηκαν.



**Σχήμα 3.8**

Το τελευταίο πείραμα που έγινε αφορά την απεικόνιση ροής καπνού παράλληλα στην επιφάνεια του πτερυγίου. Για τη καλύτερη δυνατή απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε δέσμη φωτός από λέιζερ η οποία προβαλλόταν κάθετα στην επιφάνεια του πτερυγίου, ακριβώς επάνω στη ροή του καπνού. Για τη δημιουργία του καπνού χρησιμοποιήθηκε καπνογόνο το οποίο τοποθετήθηκε στην βάση του πτερυγίου. Η καταγραφή του πειράματος έγινε με συμβατική κάμερα μάρκας Sony. Για την βέλτιστη ποιότητα των εικόνων και των βίντεο που ελήφθησαν, η διεξαγωγή του συγκεκριμένου πειράματος έγινε σε χώρο δίχως φωτισμό. Παρατήθηκαν αλλαγές στην ροή του καπνού σε σχέση με την θερμοκρασία του πτερυγίου οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε

στιγμιότυπα από το πείραμα με την χρήση δέσμης λέιζερ και καπνογόνου.



**Σχήμα 3.9**

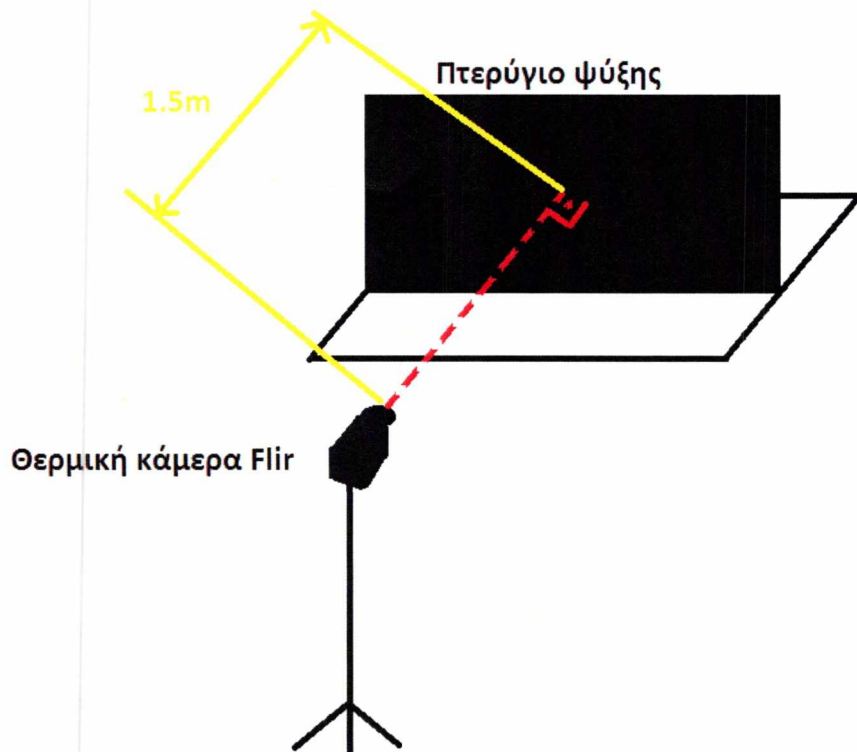
**Σχήμα 3.10**

## Κεφάλαιο 4 Πειραματική μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο έγινε η διεξαγωγή και η οργάνωση των πειραμάτων καθώς και οι συνθήκες που επικρατούσαν στο εκάστοτε πείραμα.

### 4.1 1ο πείραμα, μετρήσεις με χρήση θερμικής κάμερας

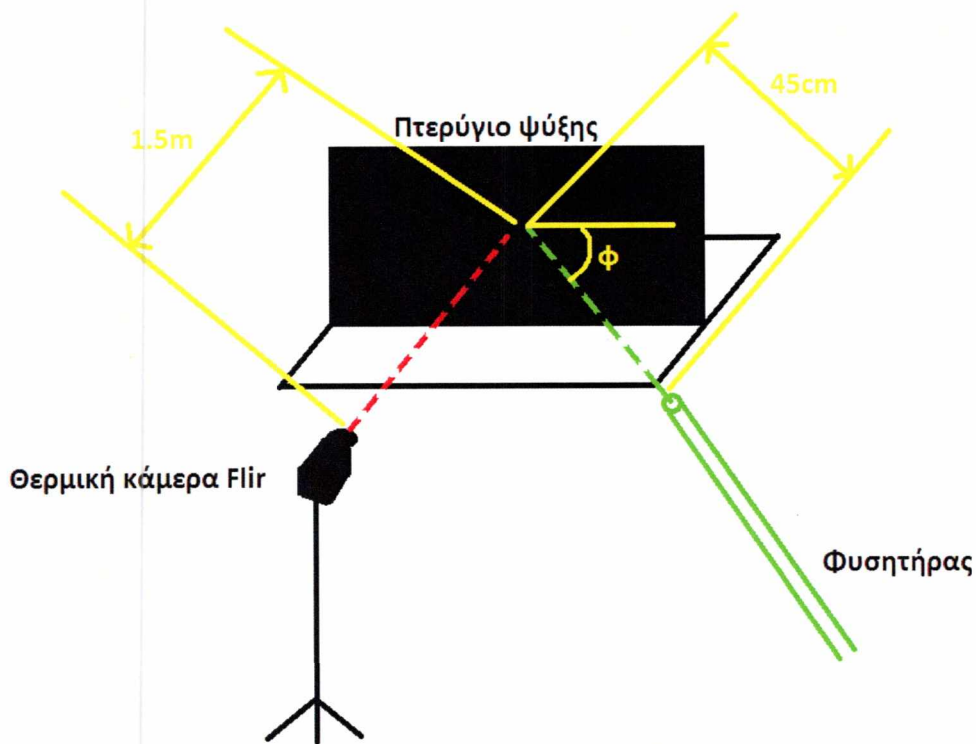
Το πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε αφορά την χρήση της θερμικής κάμερας. Αρχικά η πειραματική διάταξη τοποθετήθηκε σε ανυψωτικό μηχανισμό και συνδέθηκε σε τροφοδοτικό με παροχή τάσης 30V. Απέναντι από το πτερύγιο ψύξης και σε απόσταση 1,5 μέτρα στήθηκε η θερμική κάμερα τοποθετημένη πάνω σε τρίποδο όπως βλέπουμε και στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί. Η κάμερα συνδέθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του προγράμματος Flir εδόθησαν οι εντολές για την έναρξη της λήψης των βίντεο αλλά και για την περαιτέρω επεξεργασίας τους. Η διάταξη παρέμεινε συνδεδεμένη στην τάση ρεύματος 30V για περίπου 8 ώρες έτσι ώστε η θερμοκρασία του πτερυγίου να πλησιάσει την μέγιστη τιμή της. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την διάρκεια του πειράματος μετρήθηκε με ηλεκτρονικό θερμόμετρο και ήταν 20° C. Μεταξύ των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μεσολαβούσε κάποιο μικρό χρονικό διάστημα ώστε το πτερύγιο να επανέλθει σε αρχική θερμοκρασία.



Σχήμα 4.1

Κατά την πρώτη μέτρηση έγινε λήψη βίντεο του πτερυγίου καθώς η διάταξη παρέμενε συνδεδεμένη στην παροχή ρεύματος και χωρίς την χρήση φουσητήρα αέρος. Η λήψη αυτή είχε διάρκεια ενός λεπτού και σκοπός της ήταν η διαπίστωση της σωστής λειτουργίας της όλης συνδεσμολογίας. Αφού διαπιστώθηκε ότι όλα λειτουργούν άψογα και τα αποτελέσματα της μέτρησης κυμαίνονται σε επιθυμητά επίπεδα προχωρήσαμε στις υπόλοιπες μετρήσεις.

Στην δεύτερη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε, τοποθετήθηκε φουσητήρας αέρος διαμέτρου 2.55 χιλιοστών. Η απόστασή του από το κέντρο της πλάκας ήταν 45 εκατοστά και η γωνία πρόσκρουσης  $\varphi$  της δέσμης αέρος στο κέντρο του πτερυγίου ήταν  $55^\circ$ . Η ταχύτητα του αέρα του φουσητήρα μετρήθηκε με ειδικό ανεμόμετρο και βρέθηκε ότι ήταν 34.2 m/s. Στο σχήμα 4.2 παρακάτω βλέπουμε την συνδεσμολογία του φουσητήρα στην πειραματική διάταξη.



Σχήμα 4.2

Ο χρόνος διάρκειας λήψης της δεύτερης μέτρησης ήταν 5 λεπτά και η διάταξη παρέμενε συνδεδεμένη στην παροχή ρεύματος.

Στην τρίτη, τέταρτη και πέμπτη μέτρηση που πραγματοποιήθηκαν, όλες οι συνθήκες του πειράματος ήταν ακριβώς ίδιες με τις συνθήκες της δεύτερης μέτρησης με μόνη διαφορά τις αλλαγές στις γωνίες πρόσκρουσης του αέρα στο κέντρο του περυγίου. Στην τρίτη μέτρηση η γωνία πρόσκρουσης  $\varphi$  ήταν  $90^\circ$  και η διάρκεια λήψης βίντεο ήταν 6 λεπτά. Στην τέταρτη μέτρηση η γωνία πρόσκρουσης  $\varphi$  ήταν  $70^\circ$  και η λήψη ήταν 5 λεπτά. Η πέμπτη μέτρηση ήταν και η τελευταία που έγινε με χρήση φυσητήρα δέσμης αέρος. Η γωνία πρόσκρουσης  $\varphi$  του αέρα ήταν  $18^\circ$  και το βίντεο είχε διάρκεια 5 λεπτών. Σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν με τον φυσητήρα αέρα η διάρκεια λειτουργίας του ήταν η μισή της διάρκειας του συνολικού βίντεο δηλαδή στο δεύτερο μισό κομμάτι του κάθε βίντεο ο φυσητήρας τίθεται εκτός λειτουργίας και φαίνεται πως το περύγιο επανέρχεται στην αρχική του θερμοκρασία.

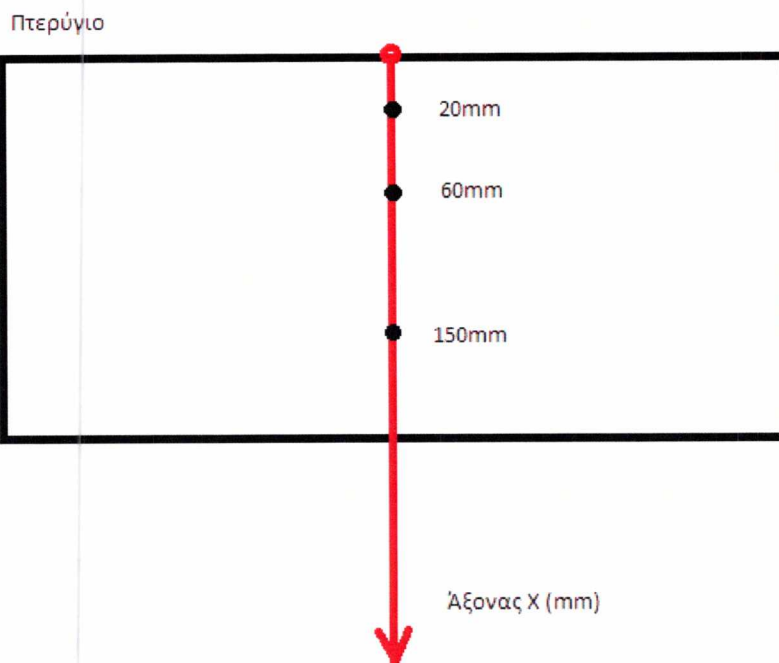




Η τελική μέτρηση που πραγματοποιήθηκε με την χρήση της θερμικής κάμερας έγινε χωρίς φυσητήρα αέρος και δίχως σύνδεση της διάταξης σε τροφοδοτικό ρεύματος. Η μέτρηση αυτή ξεκίνησε 5 λεπτά αφότου ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις με τον φυσητήρα. Την στιγμή που αποσυνδέθηκε το τροφοδοτικό τάσης άρχισε και η λήψη του τελευταίου βίντεο το οποίο είχε διάρκεια 9 λεπτών. Σκοπός του βίντεο αυτού ήταν η αποτύπωση του ρυθμού αποβολής θερμότητας του πτερυγίου έστω και σε ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα.

#### **4.2 2ο πείραμα, μετρήσεις με χρήση θερμοστοιχείων**

Στο πείραμα που ακολούθησε έγινε χρήση των θερμοστοιχείων του πτερυγίου και μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται πάνω του συναρτήσει του χρόνου. Η πειραματική διάταξη σε αυτή την περίπτωση συνδεόταν με το τροφοδοτικό τάσης 30 Volt και έμενε συνδεδεμένη μέχρι να αναπτυχθεί η μέγιστη θερμοκρασία στο πτερύγιο. Έπειτα αποσυνδεόταν και αναμέναμε το πτερύγιο να ξαναφτάσει την θερμοκρασία δωματίου του πειράματος. Τα θερμοστοιχεία συνδέθηκαν με πολύμετρο της Protek multimeter 506 σε σειριακή σύνδεση με το οποίο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, αλλά και με Juno μεταγωγέα/ενισχυτή σε σύνδεση με υπολογιστή με θύρα usb. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PC Labview για την λειτουργία και την επεξεργασία του παραπάνω μηχανήματος αλλά και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σκοπός του πειράματος αυτού είναι η μελέτη της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο πτερύγιο σε σχέση με τον χρόνο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις, η κάθε μια σε διαφορετικό ζεύγος θερμοστοιχείων. Όλες οι μετρήσεις γίνανε στο κέντρο του πτερυγίου όσον αφορά τον οριζόντιο άξονά του αλλά σε τρία διαφορετικά ύψη. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα φαίνεται σε ποια σημεία του πτερυγίου έγιναν οι μετρήσεις.



**Σχήμα 4.3**

Η πρώτη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 20 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του πτερυγίου. Η θερμοκρασία του δωματίου ήταν 20° C και η μέτρηση διήρκησε συνολικά 24 ώρες. Η πειραματική διάταξη έμεινε συνδεδεμένη στο τροφοδοτικό για περίπου 10 ώρες και έπειτα αποσυνδέθηκε. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής κατέγραφε μετρήσεις της θερμοκρασίας ανά 1 δευτερόλεπτο.

Η δεύτερη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 60 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του πτερυγίου. Εδώ η θερμοκρασία δωματίου ήταν 19° C και το η μέτρηση αυτή είχε διάρκεια 36 ωρών. Ο υπολογιστής κατέγραφε μετρήσεις με τον ίδιο ρυθμό όπως και πριν. Η αποσύνδεση από το ρεύμα έγινε εδώ στις 22 ώρες.

Τέλος η τρίτη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 150 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του πτερυγίου. Η μέτρηση αυτή είχε διάρκεια 33 ωρών και η αποσύνδεση από το ρεύμα έγινε εδώ στις 24 ώρες. Ο ρυθμός συλλογής

αποτελεσμάτων ήταν ο ίδιος με τις προηγούμενες μετρήσεις. Η θερμοκρασία του δωματίου ήταν 18° C.

### 4.3 3ο πείραμα, απεικόνιση ροής με χρήση καπνογόνου

Το τελικό πείραμα που πραγματοποιήθηκε αφορά την απεικόνιση καπνού που ρέει παράλληλα στο πτερύγιο όταν αυτό βρίσκεται υπό διάφορες θερμοκρασίες. Για να γίνει εδώ σωστή απεικόνιση χρησιμοποιήθηκε δέσμη φωτός λέιζερ που προσέκρουε κάθετα στο πτερύγιο. Σε έναν ειδικά διαμορφωμένο πάγκο απέναντι από την πειραματική διάταξη τοποθετήθηκε συσκευή λέιζερ της οποίας η δέσμη ήταν κάθετη και προς τα επάνω. Πάνω από τη συσκευή λέιζερ τοποθετήθηκε μηχανισμός ο οποίος έφερε περιστρεφόμενο κάτοπτρο. Η δέσμη του λέιζερ κτυπούσε το κάτοπτρο αυτό με αποτέλεσμα να αντανακλάται κάθετα πάνω στο πτερύγιο που βρισκόταν απέναντι δημιουργώντας στην ουσία στο πτερύγιο μια κάθετη γραμμή φωτός.



Σχήμα 4.4

Έπειτα στήθηκε κάμερα μάρκας Sony σε τρίποδο δίπλα από την συνολική πλέον διάταξη. Οι λήψεις των βίντεο έγιναν από διάφορες οπτικές γωνίες. Στην βάση του

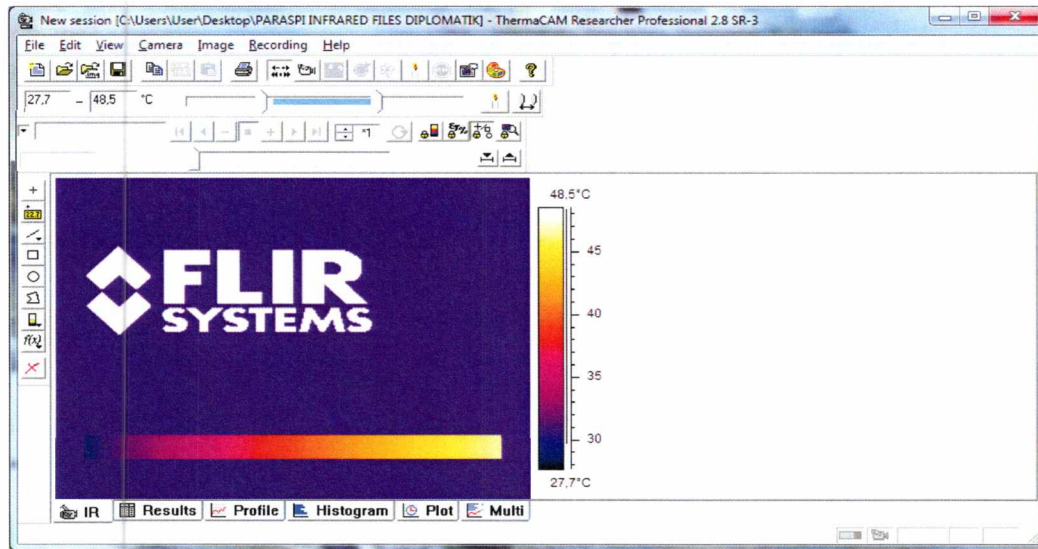
περυγίου στήθηκε καπνογόνο ακριβώς εκεί όπου προσκρούει η δέσμη από το λέιζερ.

Σε αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις, μία με το περύγιο σε θερμοκρασία δωματίου και μία με το περύγιο σε υψηλή θερμοκρασία αφού συνδέθηκε για αρκετή ώρα σε τροφοδοτικό τάσης 30V. Για καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων στην κάμερα και οι δύο μετρήσεις έγιναν χωρίς φωτισμό. Έπειτα η κάμερα συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου αποθηκευτήκαν και επεξεργάστηκαν τα βίντεο που ελήφθησαν.

#### **4.4 Χρήση του λογισμικού της θερμικής κάμερας**

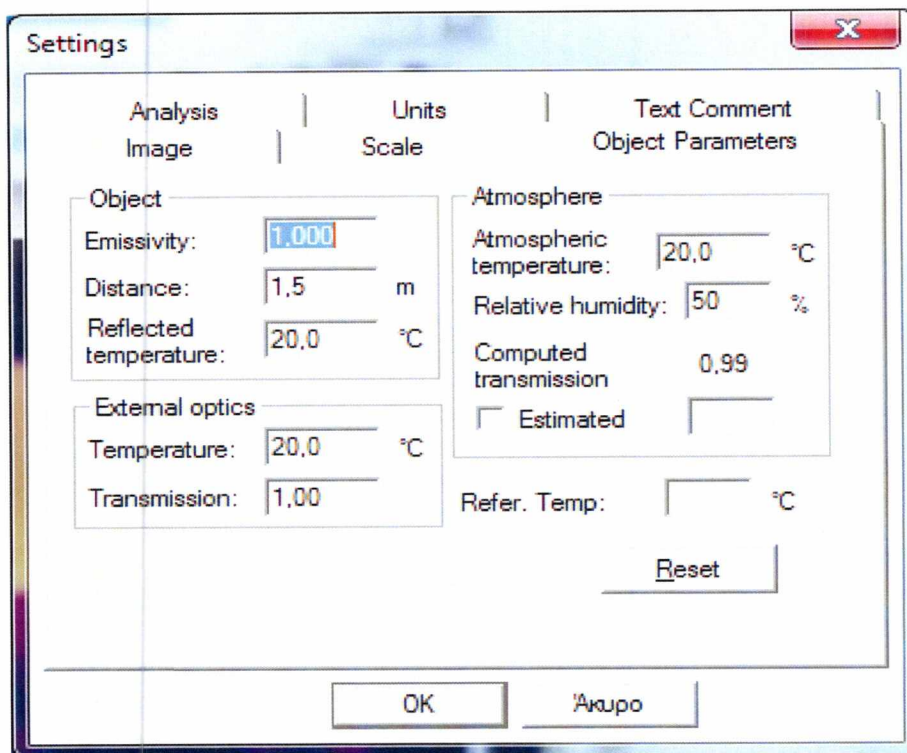
Όσον αφορά το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την θερμική κάμερα είναι της εταιρίας Flir και ονομάζεται ThermaCAM Researcher Professional 2.8 SR-3. Το λογισμικό αυτό αποτελεί τη διεπιφάνεια (interface) της βιντεοκάμερας με βάση το οποίο έχουμε τη δυνατότητα να καταγράφουμε την εικόνα την οποία λαμβάνει η θερμική κάμερα και στη συνέχεια να την υποβάλλουμε σε περαιτέρω επεξεργασία. Στη συγκεκριμένη περίπτωση της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε η καταγραφή του βίντεο για κάθε πείραμα ξεχωριστά που επιχειρήθηκε στο περύγιο. Στην συνέχεια τα βίντεο αποθηκεύτηκαν στην μνήμη του υπολογιστή με σκοπό την επεξεργασία τους στη συνέχεια από το ίδιο λογισμικό. Στο σημείο αυτό, δίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας η οποία ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Αρχικά ανοίγουμε το interface του λογισμικού:



Σχήμα 4.5

Στη συνέχεια βρίσκουμε το αποθηκευμένο βίντεο στον υπολογιστή μας και το εισάγουμε (σύρουμε) μέσα στη διεπιφάνεια. Αφού έχει εισαχθεί το βίντεο μέσα στο λογισμικό, στη συνέχεια ρυθμίζουμε τις παραμέτρους που αφορούν την περίπτωσή μας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή image-settings και διαλέγουμε από το αναδυόμενο μενού τις ρυθμίσεις που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε. Σημαντικό πεδίο για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων αποτελεί το πεδίο object parameters.



Σχήμα 4.6

**Emissivity=1:** αφορά στον συντελεστή εκπομπής της θερμαινόμενης επιφάνειας, όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα μιας στερεής επιφάνειας τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής εκπομπής. Η τιμή που επιλέχθηκε για εμάς αφορά πλάκα αλουμινίου στην οποία έγινε βαφή με πυρίμαχη μαύρη ματ μπογιά εμπλουτισμένη με ψιλή άμμο για περισσότερη τραχύτητα.

**Distance=1.5 m:** Αφορά την απόσταση του φακού της θερμικής κάμερας από το προς εξέταση στερεό αντικείμενο.

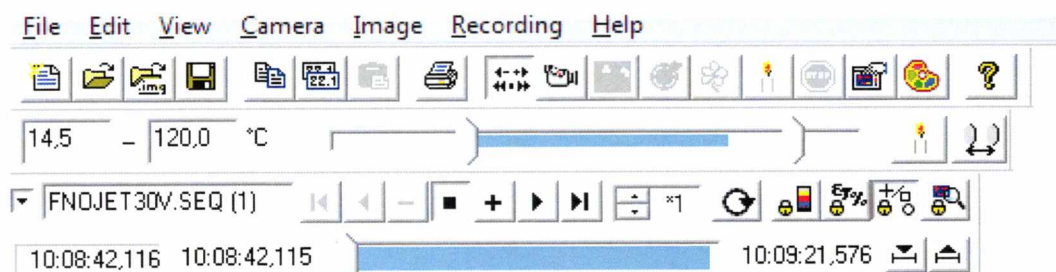
**Reflected temperature=20° C:** Αφορά τη θερμοκρασία των αντικειμένων που γειτνιάζουν με το προς εξέταση αντικείμενο μας κι επιλέχθηκε να είναι ίση με την ατμοσφαιρική θερμοκρασία.

**Atmospheric temperature=20° C:** η ατμοσφαιρική θερμοκρασία την περίοδο εκτέλεσης των πειραμάτων.

**Relative humidity=0.5:** η σχετική υγρασία που επικρατούσε στο χώρο τη

στιγμή εκτέλεσης των πειραμάτων.

Γνωρίζοντας εκ των προτέρων τη φύση του προβλήματος που εξετάζει κανείς είναι δυνατό να ρυθμίσει ένα θερμοκρασιακό εύρος μέσα στο οποίο θα κυμανθεί το φαινόμενο και ταυτόχρονα να αντιλαμβάνεται την εξέλιξή του με βάση την εικόνα. Για αυτό το λόγο ρυθμίστηκε το θερμοκρασιακό εύρος στην περίπτωση μας από 14,5° C έως 120° C . Για να εντοπιστεί το αντικείμενό μας σε περίπτωση που ακόμα δεν έχει εξελιχθεί το φαινόμενο και δεν υπάρχουν οι απαιτούμενες θερμοκρασιακές διαφορές για τη διάκριση των αντικειμένων σε ένα τόσο μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος υπάρχει η δυνατότητα της αυτόματης ρύθμισης του θερμοκρασιακού εύρους με την εντολή auto-adjust-scale που λαμβάνει ως όρια την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που αντιλαμβάνεται η θερμική κάμερα κι έτσι τα διάφορα αντικείμενα ξεχωρίζουν με βάση τις πολύ μικρές θερμοκρασιακές τους διαφορές που γίνονται αντιληπτές σε αυτό το επίπεδο.

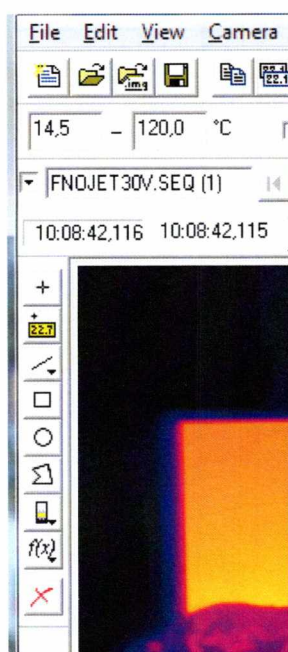


Σχήμα 4.7

Η λήψη των αντιπροσωπευτικών τιμών θερμοκρασίας πάνω στο περύγιο αποτελεί στην ουσία τα δεδομένα προς επεξεργασία για την εξαγωγή των συμπερασμάτων μας. Η διαδικασία περιελάμβανε την αναπαραγωγή του βίντεο και την ταυτόχρονη καταγραφή των επιλεγμένων τιμών κατά τη διάρκειά του. Η αναπαραγωγή του βίντεο επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού δίνοντάς μας την

εξέλιξη στο πεδίο του "IR image", παρέχοντάς μας παράλληλα τη δυνατότητα να επιλέξουμε την αρχή και το τέλος καθώς και την ταχύτητα που θέλουμε να επιτύχουμε ρυθμίζοντας το χρονικό βήμα, όπως γίνεται και σε ένα κοινό "media player".

Συγχρόνως παρέχεται η δυνατότητα να βλέπουμε τη τιμή της θερμοκρασίας σε σημεία ή ολόκληρες περιοχές σημείων. Η συνεχής μετακίνηση μέσα στο IR image γίνεται με το flying spotmeter, ενώ υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης σταθερών γεωμετρικών στοιχείων όπως σημείου, γραμμής, ορθογωνίου κύκλου, πολυγώνου (spotmeter, line, box area, circle).

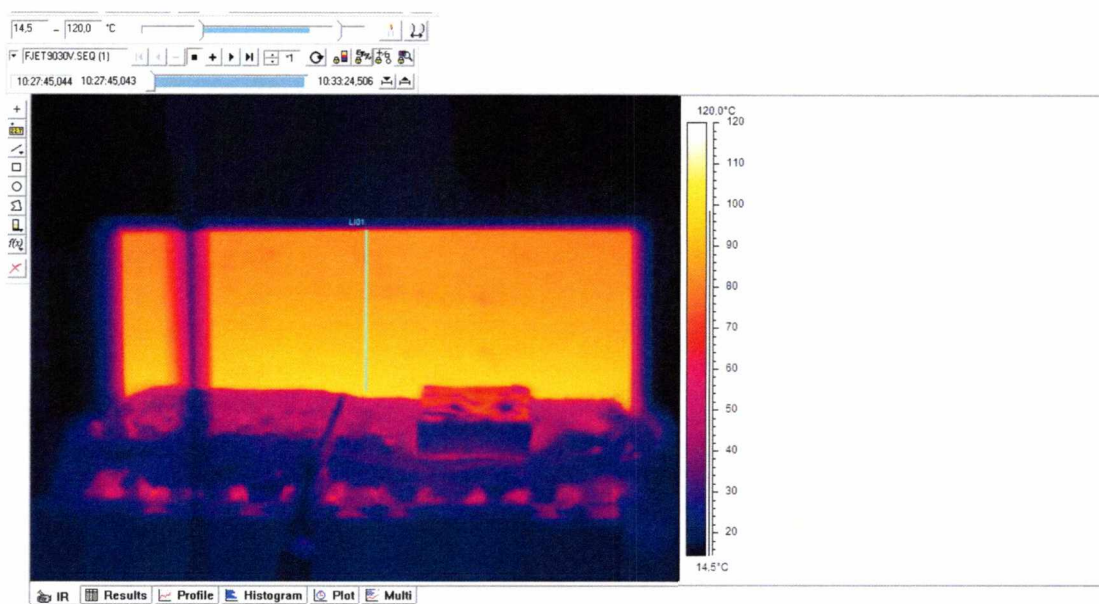


Σχήμα 4.8

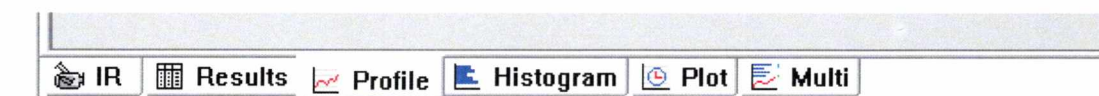
Για την διεξαγωγή αναλυτικότερων αποτελεσμάτων από την χρήση του λογισμικού της θερμικής κάμερας αποφασίσαμε να χωρίσουμε την επιφάνεια του περυγίου σε τέσσερα ίσα τμήματα. Έτσι με την εντολή add line σχεδιάστηκαν τρεις κάθετες γραμμές στην επιφάνεια του περυγίου. Επιλέγοντας κάτω την εντολή



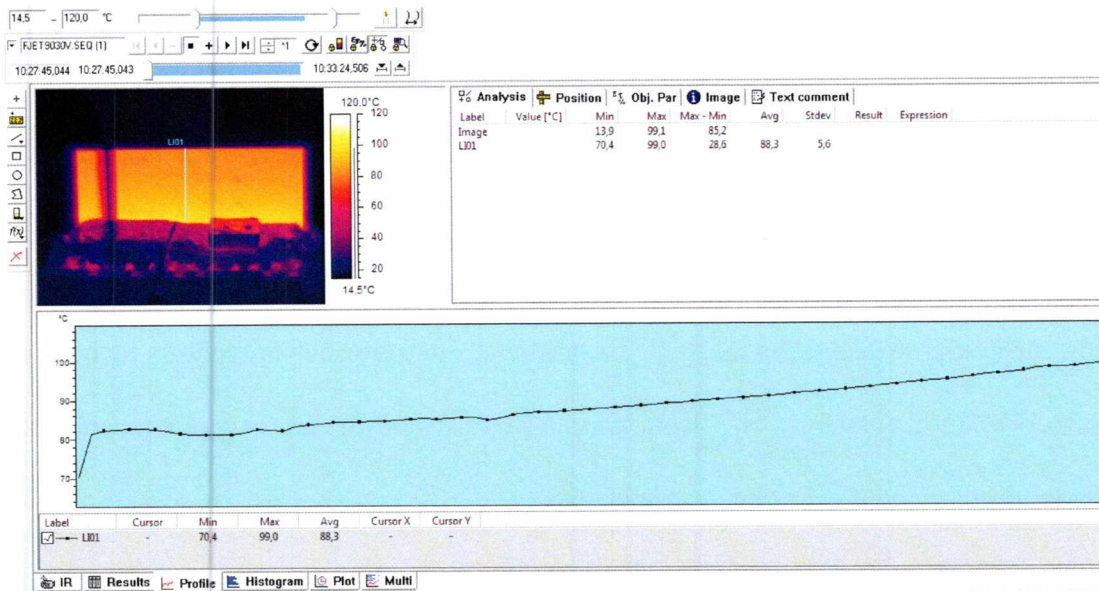
Profile, το πρόγραμμα της κάμερας μας δημιουργεί διαγράμματα για κάθε γραμμή που σχεδιάστηκε στα οποία απεικονίζεται στον κάθετο άξονα η θερμοκρασία της γραμμής και στον οριζόντιο άξονα το μήκος της γραμμής, ξεκινώντας από την επάνω θέση, δηλαδή το επάνω μέρος του πετυγιού. Επίσης μας παρέχει πληροφορίες για την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία της γραμμής, αλλά και την μεταξύ τους διαφορά, καθώς και για την μέση θερμοκρασία της γραμμής, όπως βλέπουμε και στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 4.9



Σχήμα 4.10



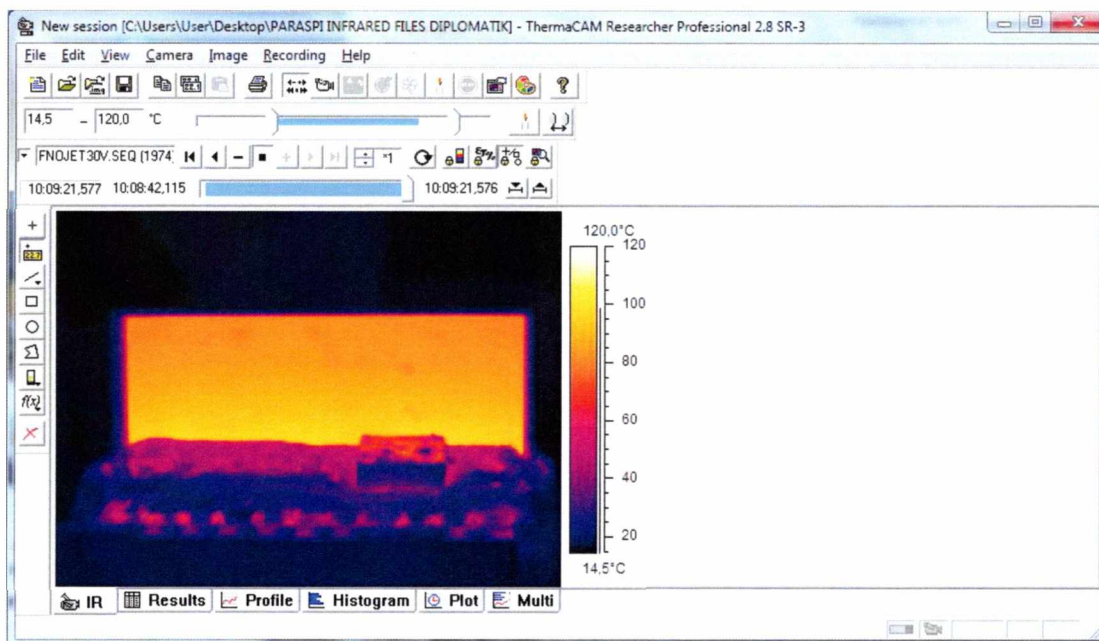
Σχήμα 4.11

## Κεφάλαιο 5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα πραγματοποιηθεί μία παράθεση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις του 4ου κεφαλαίου καθώς και οι μεταξύ αυτών συγκρίσεις. Θα παρουσιαστούν στιγμιότυπα από τις λήψεις των βίντεο της θερμικής κάμερας σε όλες τις περιπτώσεις μετρήσεων, διαγράμματα από τον ρυθμό αύξησης/μείωσης της θερμοκρασίας στο περύγιο και στιγμιότυπα από την λήψη βίντεο των μετρήσεων με καπνογόνο.

### 5.1 Αποτελέσματα 1ου πειράματος (θερμική κάμερα)

Θα ξεκινήσουμε με το πρώτο πείραμα δηλαδή με το πείραμα που έγινε με την θερμική κάμερα, στο οποίο είχαν πραγματοποιηθεί έξι διαφορετικές μελέτες. Στην πρώτη μελέτη η θερμοκρασία του περυγίου κυμαίνεται στα ανώτατα όρια της αφού η συνδεσμολογία τροφοδοτείτε με ρεύμα 30 Volt για περίπου 8 ώρες. Το περύγιο απεικονίζεται στον υπολογιστή μέσω της θερμικής κάμερας στην παρακάτω μορφή:



Σχήμα 5.1

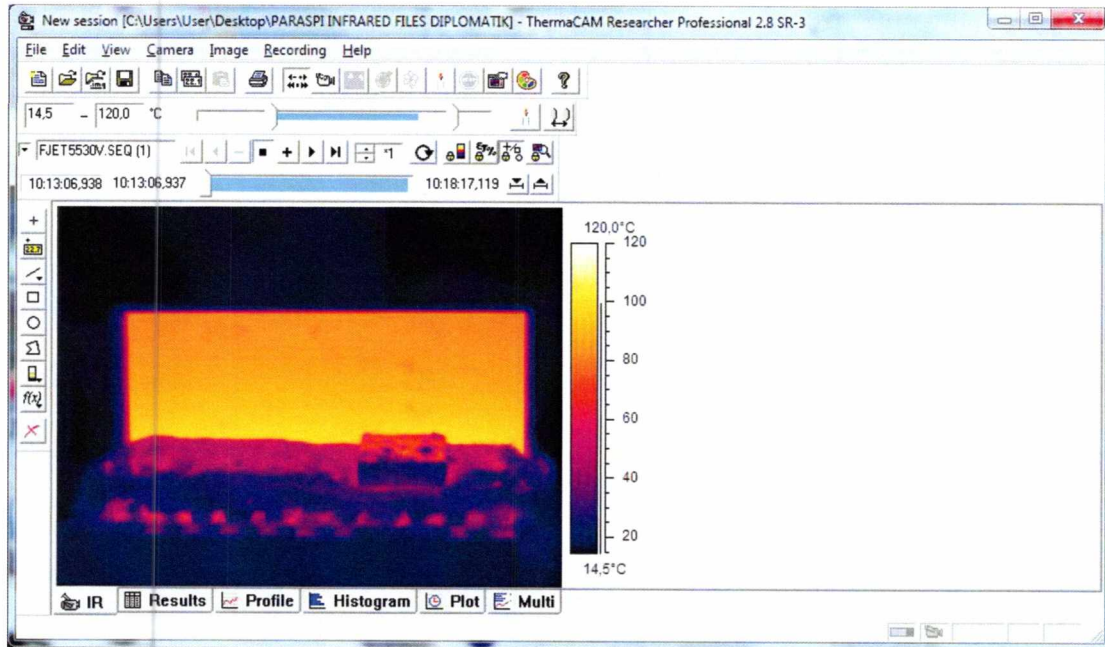
Εδώ το βίντεο έχει διάρκεια περίπου ένα λεπτό και δεν έχουμε κάποια μεταβολή της θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο επομένως δεύτερο στιγμιότυπο θα ήταν περιττό.

Στις υπόλοιπες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε φουσητήρας αέρα σε διαφορετικές μοίρες κλίσης. Η χρήση του φουσητήρα είχε διάρκεια σε κάθε μέτρηση περίπου έως την μισή διάρκεια της συνολικής λήψης, δηλαδή στη μέση περίπου του κάθε βίντεο σταματούσε η δέσμη αέρα. Στο δεύτερο μισό από κάθε βίντεο φαίνεται πως το πτερύγιο επανέρχεται στην αρχική θερμοκρασία του.

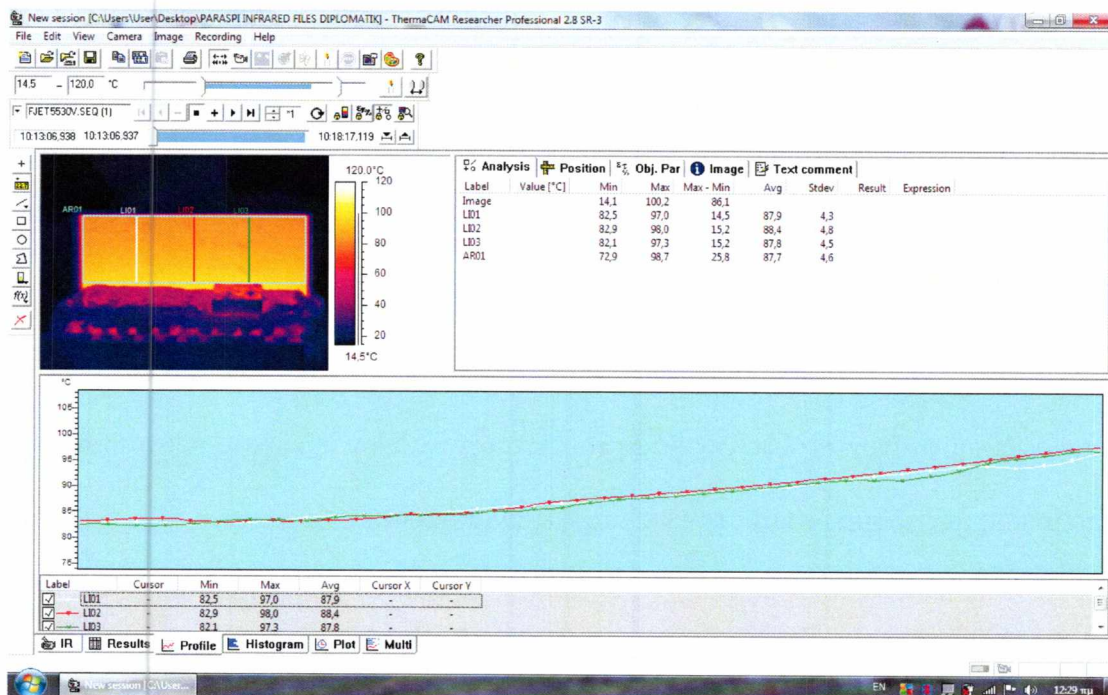
Σημαντικό εδώ ήταν όμως να μελετήσουμε και αναλυτικότερα τις μεταβολές των θερμοκρασιών στο πτερύγιο στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με φουσητήρα καθώς και η διεξαγωγή σημαντικών στοιχείων, όπως μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αλλά και την μεταξύ τους διαφορά, της μέσης θερμοκρασίας και την παρουσίαση διαγραμμάτων θερμοκρασίας-θέσης. Για τον λόγο αυτό μέσω του λογισμικού της θερμικής κάμερας στην επιφάνεια του πτερυγίου σχεδιάστηκαν τρεις κάθετες γραμμές με την εντολή add line, χωρίζοντας έτσι το πτερύγιο σε τέσσερα ίσα κομμάτια. Παρακάτω θα ακολουθήσουν στιγμιότυπα ανά λεπτό για όλες τις μετρήσεις που έγιναν με φουσητήρα αέρα. Τα διαγράμματα θα απεικονίζουν την σχέση θερμοκρασίας ανά μήκος γραμμής, για κάθε γραμμή, ξεκινώντας από την κορυφή και φτάνοντας έως την βάση του πτερυγίου. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται το μήκος των γραμμών και στον κάθετο η θερμοκρασία.

Στην δεύτερη μέτρηση που έγινε χρησιμοποιήθηκε φουσητήρας αέρος με γωνία πρόσκρουσης της δέσμης αέρα στις  $55^{\circ}$ . Το βίντεο είχε διάρκεια 5 λεπτών και θα παρουσιαστούνε αποσπασματικά στιγμιότυπα ανά ένα λεπτό ξεκινώντας από το μηδέν. Ο φουσητήρας σταματά να λειτουργεί περίπου στα 3 λεπτά.

Παρακάτω το περσόγιο πριν τεθεί σε λειτουργία ο φουσητήρας.

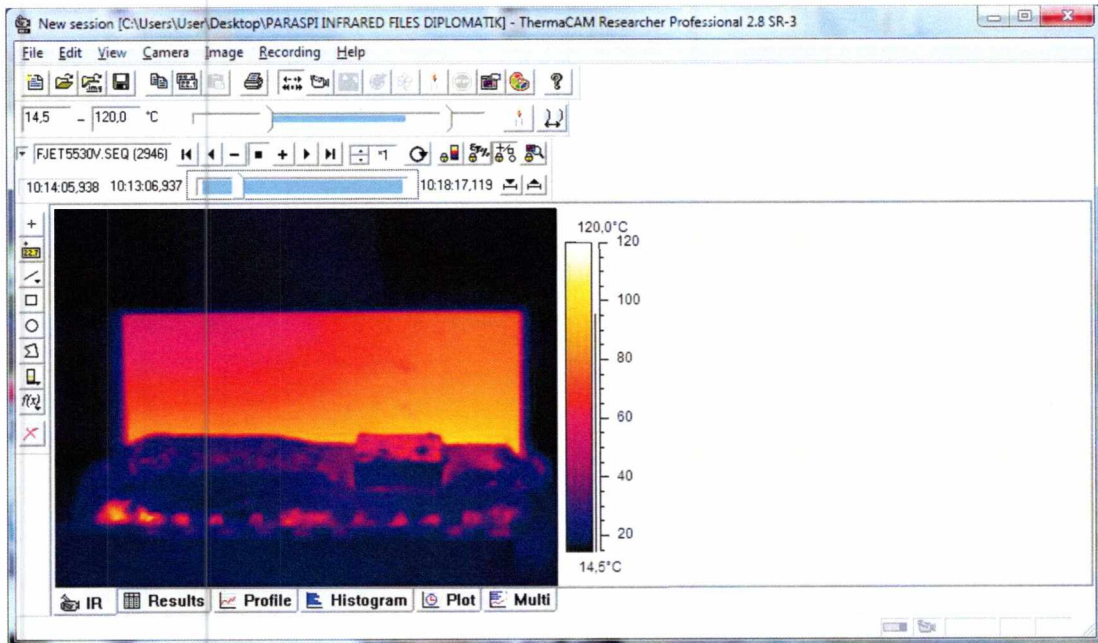


Σχήμα 5.2

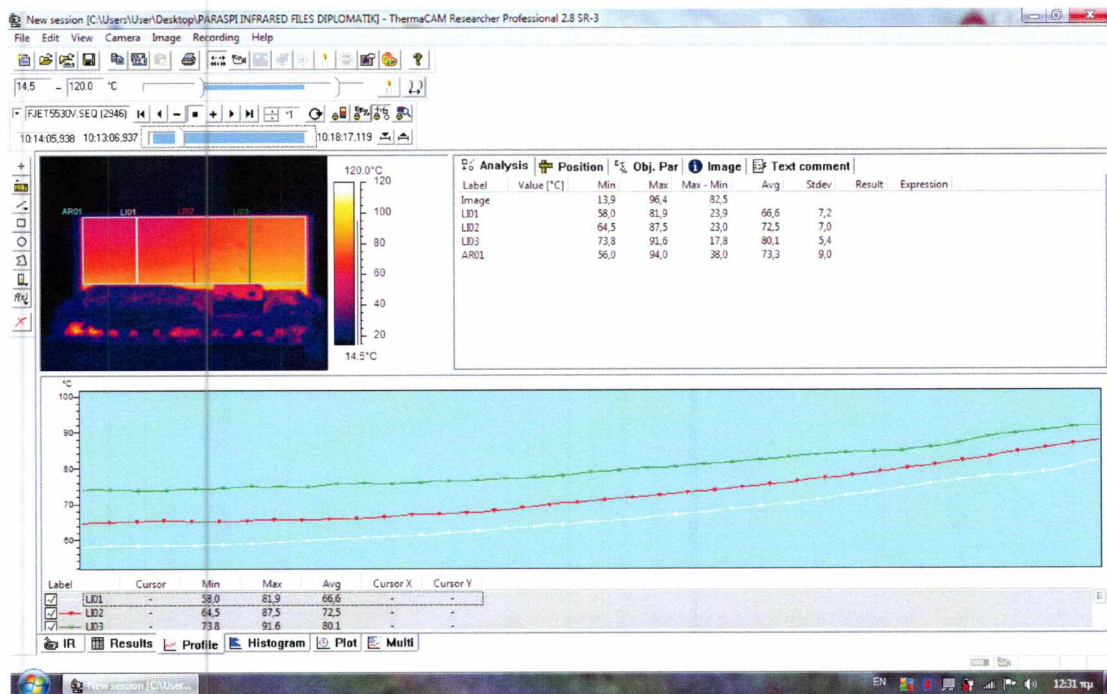


Σχήμα 5.3

Παρατηρούμε στις παρακάτω εικόνες, μετά από 1 λεπτό, πως ξεκινά η ψύξη του πετυγίου από πάνω αριστερά αφού το χρώμα αρχίζει να μετατρέπεται από κίτρινο σε μωβ. Το φαινόμενο παρατηρείται και από τα διαγράμματα.

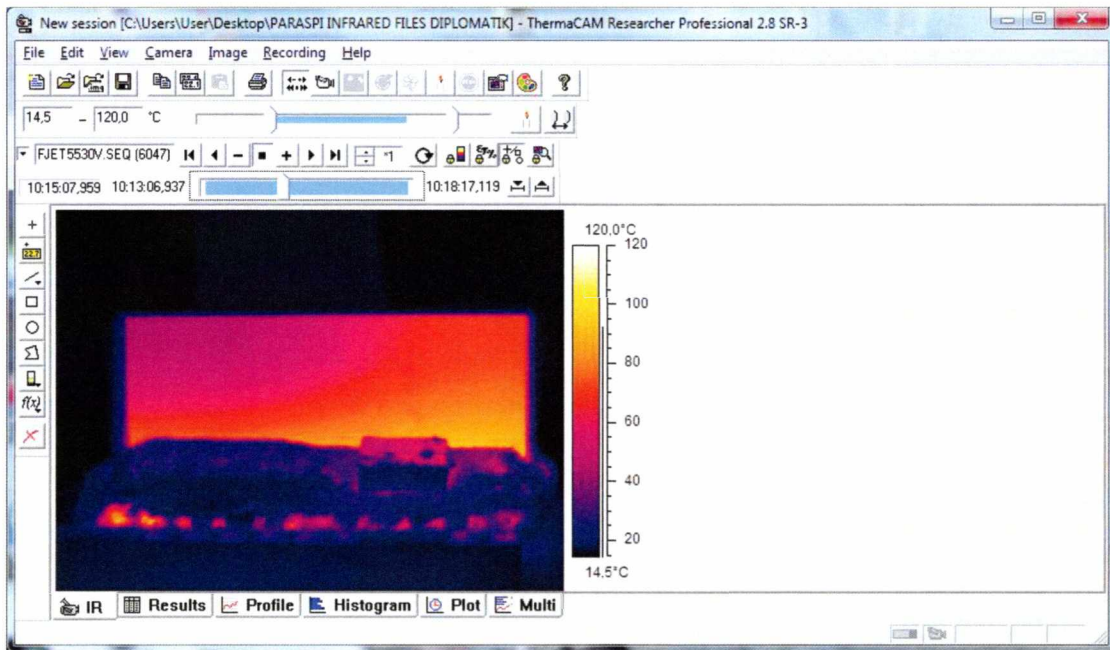


Σχήμα 5.4

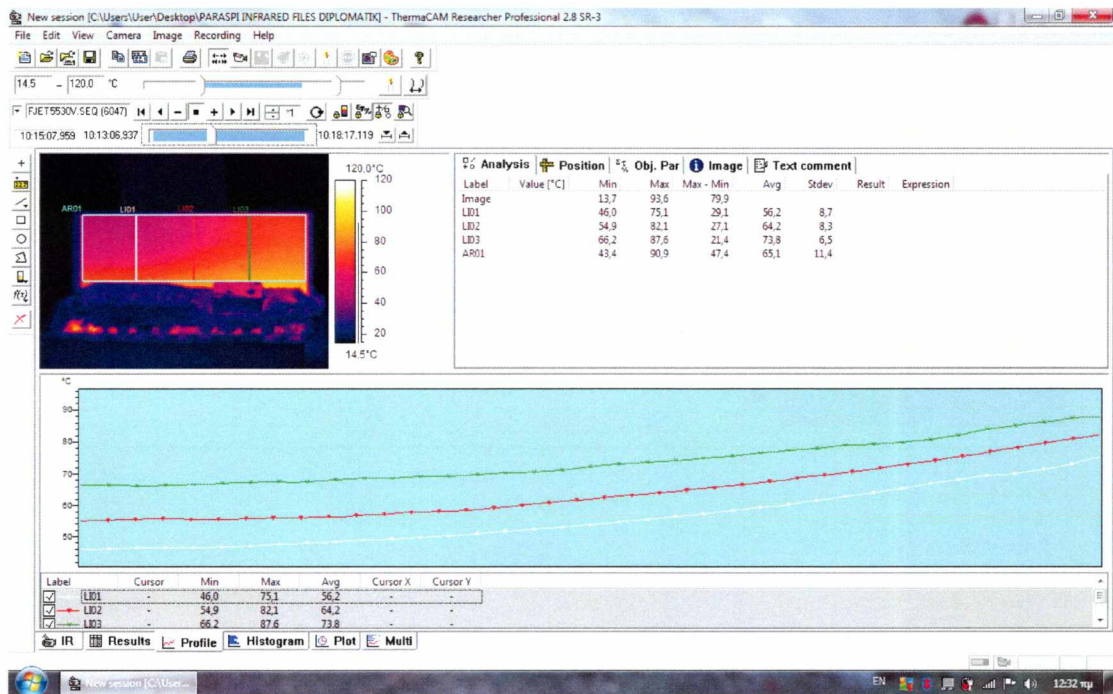


Σχήμα 5.5

Σταδιακά η ψύξη του περυγίου εξαπλώνεται προς το κέντρο και προς το κάτω μέρος του περυγίου. Το παρακάτω στιγμιότυπο είναι μετά από 2 λεπτά.

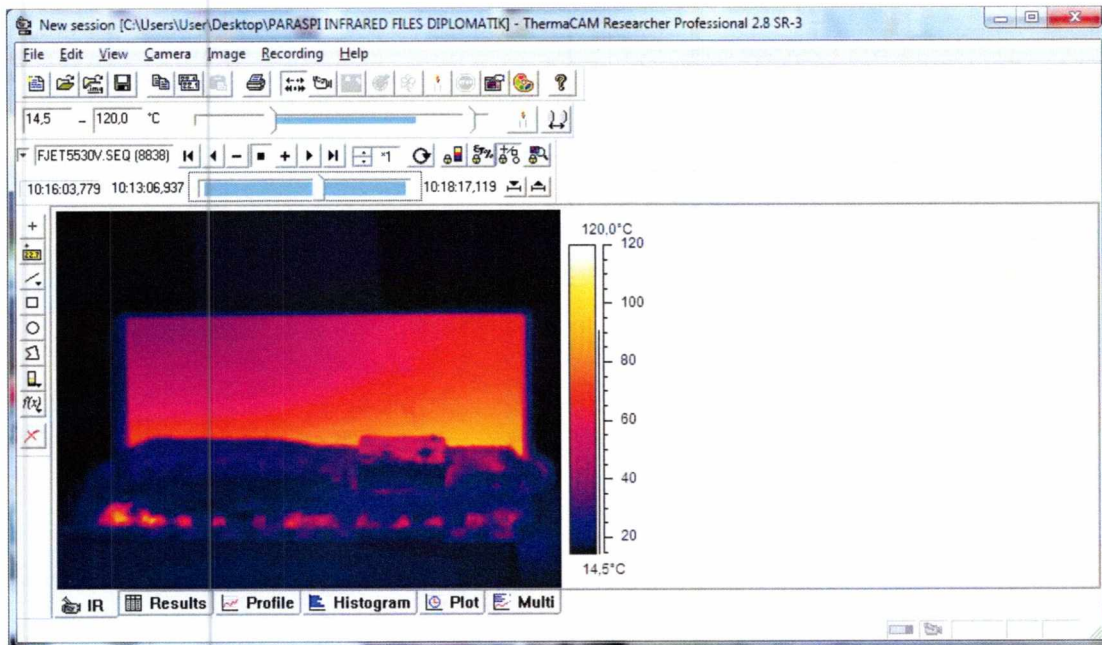


Σχήμα 5.6

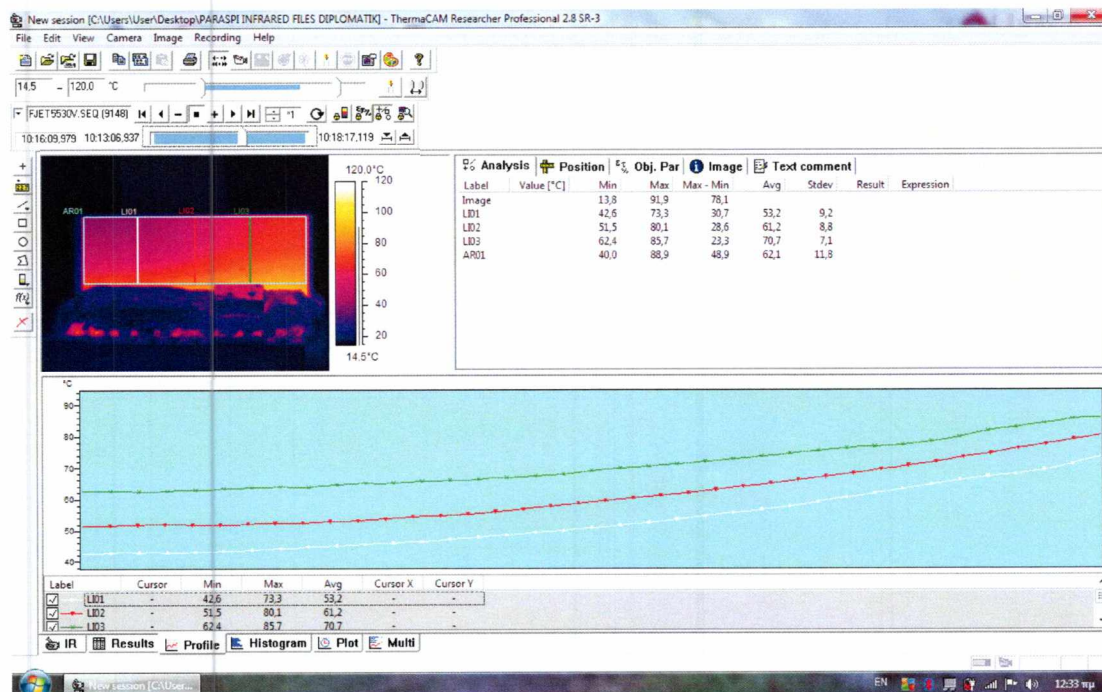


Σχήμα 5.7

Στα παρακάτω σχήματα στο 3ο λεπτό βλέπουμε την μέγιστη επιρροή του φουσητήρα πάνω στο περυσίο. Παρατηρούμε πως μεγάλο τμήμα του περυσίου στα δεξιά δεν επηρεάζεται από την ψύξη. Μέτα από αυτό το στιγμιότυπο η λειτουργία του φουσητήρα σταματά.



Σχήμα 5.8

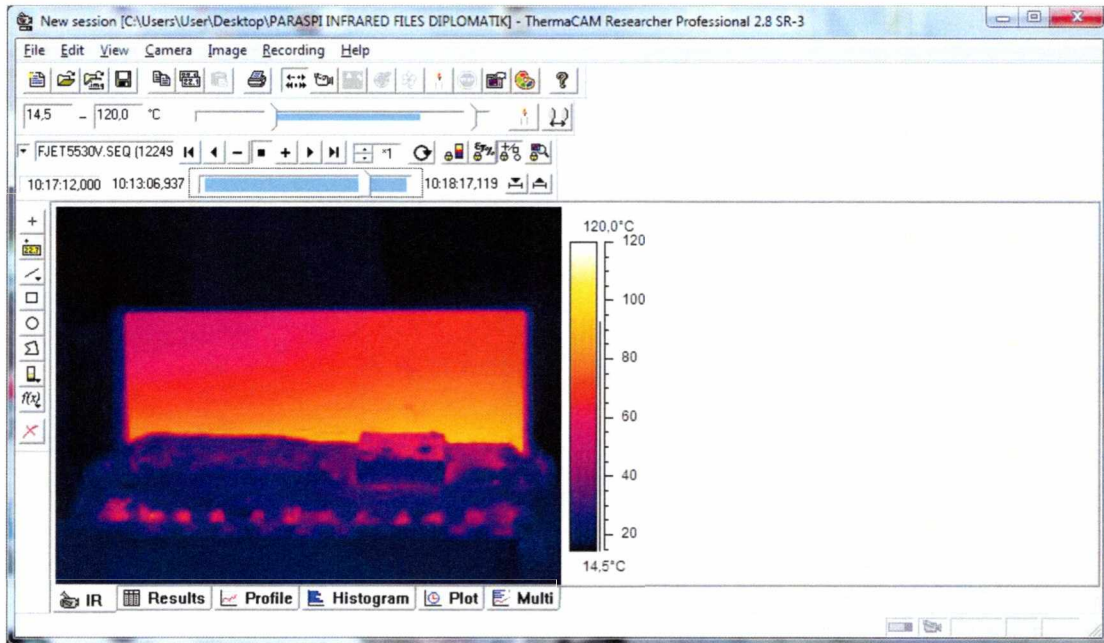


Σχήμα 5.9

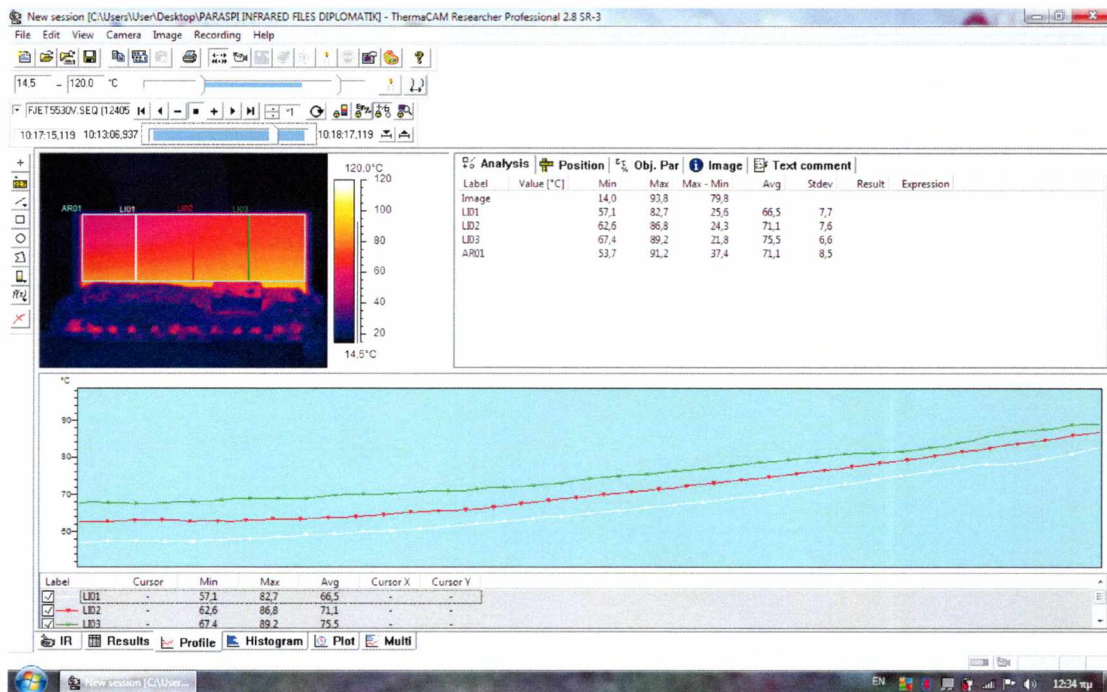


Στα επόμενα δύο στιγμιότυπα, 4ο και 5ο λεπτό παρατηρούμε πως η θερμοκρασία του περηνγίου επανέρχεται στα αρχικά επίπεδα, δηλαδή όπως ήταν πριν ασκηθεί αέρας.

Για το 4ο λεπτό παρακάτω.

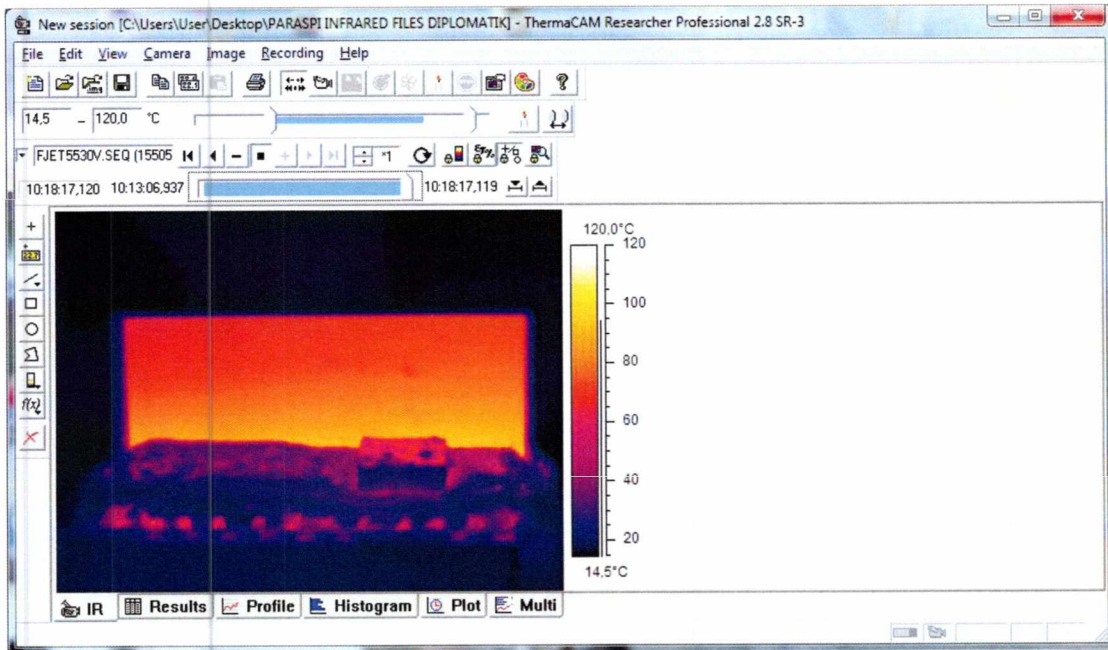


Σχήμα 5.10

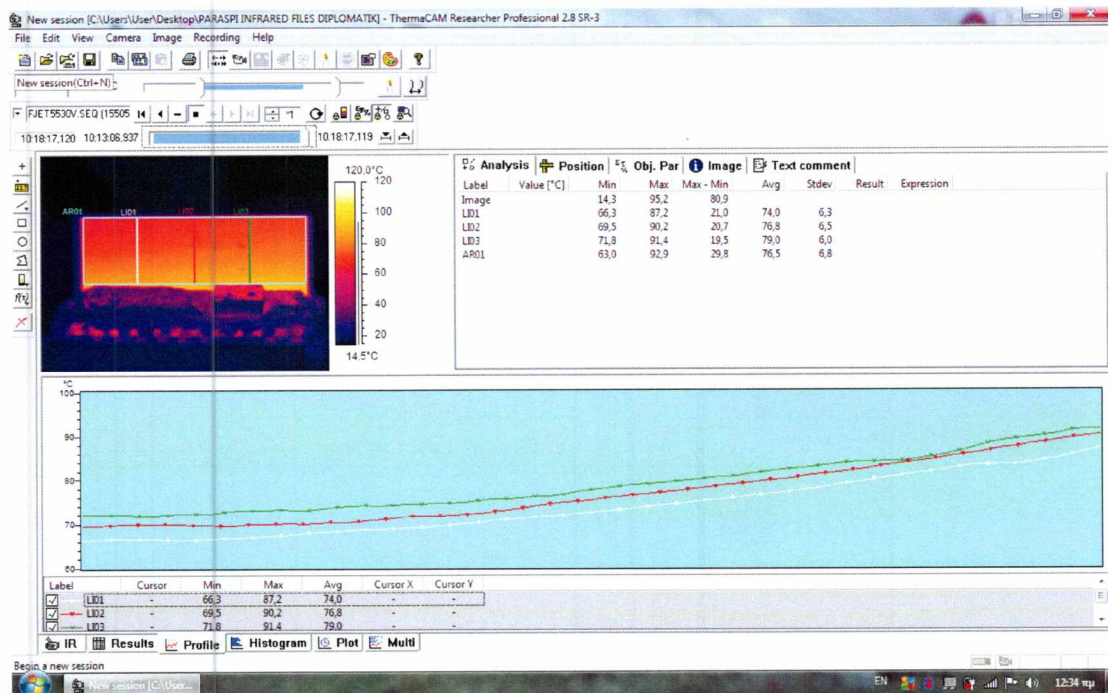


Σχήμα 5.11

Παρακάτω για το 5ο λεπτό. Οι θερμοκρασίες έχουν σχεδόν επανέλθει και τα διαγράμματα αρχίζουν να πλησιάζουν μεταξύ τους.



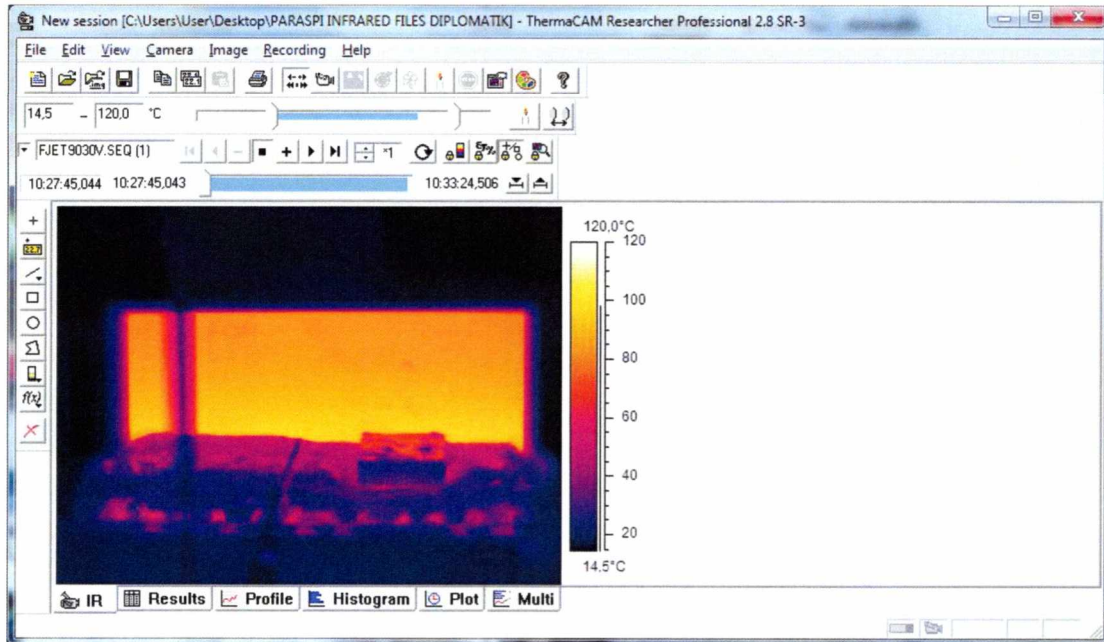
Σχήμα 5.12



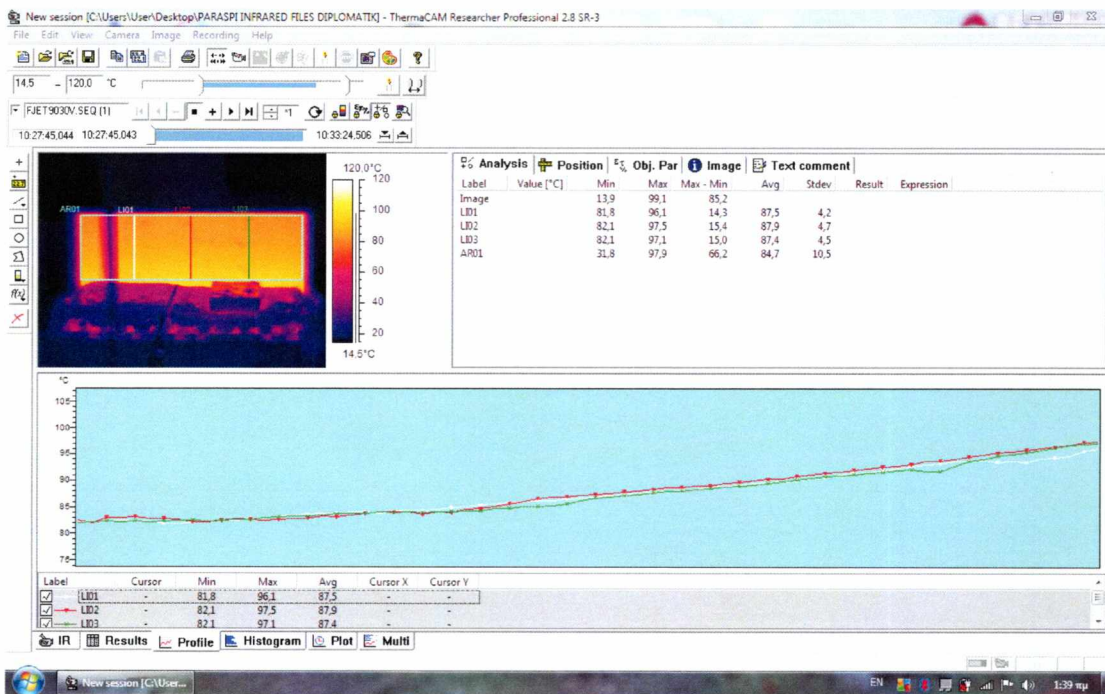
Σχήμα 5.13

Η τρίτη μέτρηση έγινε με την γωνία πρόσκρουσης του φουσητήρα στις 90° δηλαδή κάθετα στο περύνιο και είχε διάρκεια 6 λεπτών. Ακολουθούν στιγμιότυπα ανά 1 λεπτό. Ο φουσητήρας τίθεται εκτός λειτουργίας στα 3 περίπου λεπτά.

Στιγμιότυπο αρχικά πριν την χρήση του φουσητήρα.

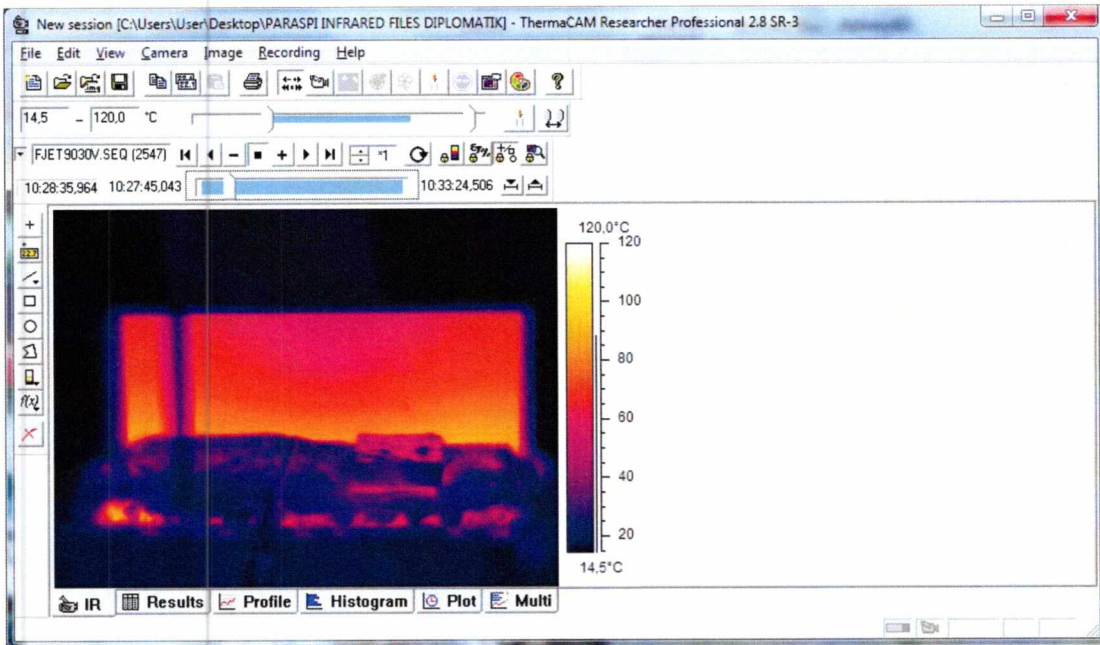


Σχήμα 5.14

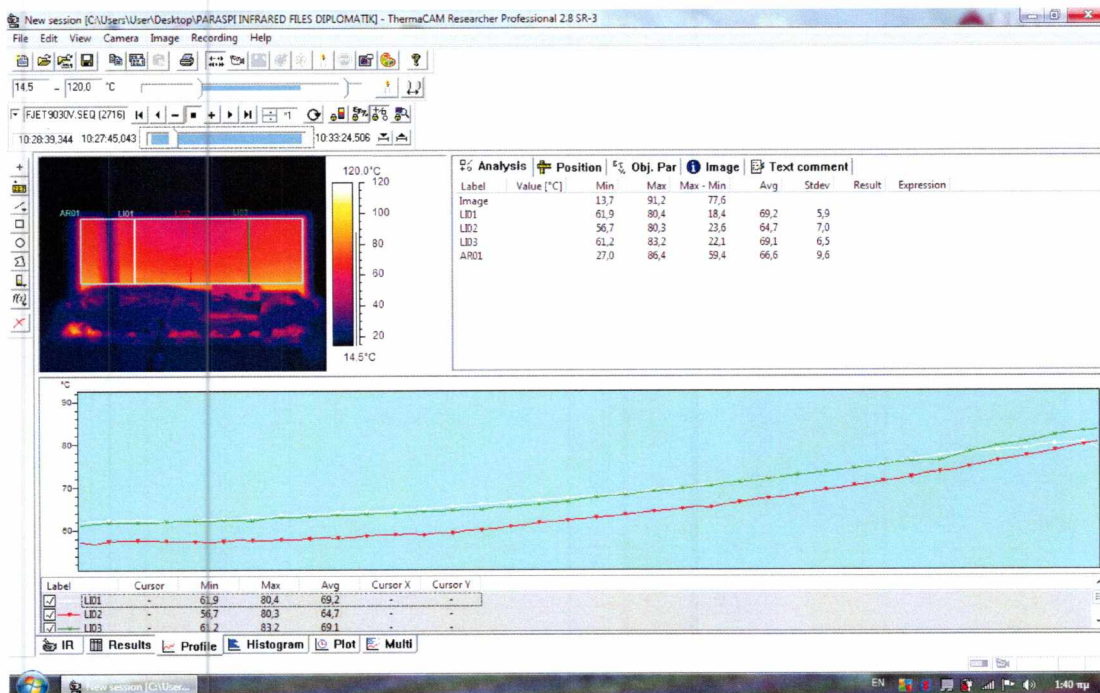


Σχήμα 5.15

Παρατηρούμε στο παρακάτω στιγμιότυπο στο 1ο λεπτό πως η ψύξη ξεκινά κεντρικά και στο πάνω μέρος του περυγίου.



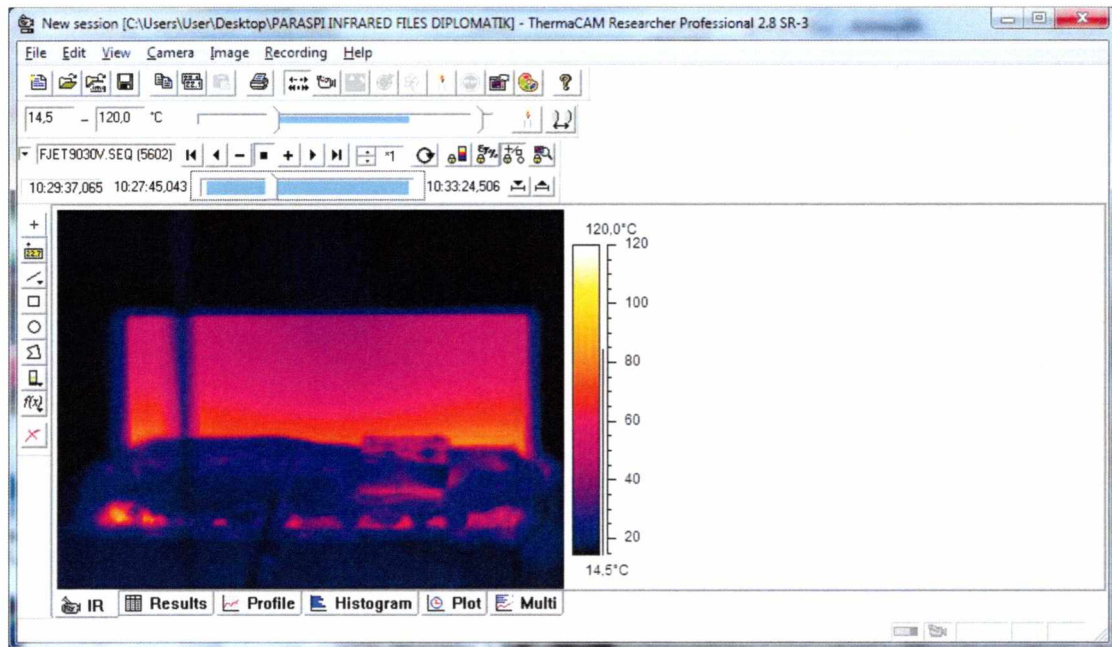
Σχήμα 5.16



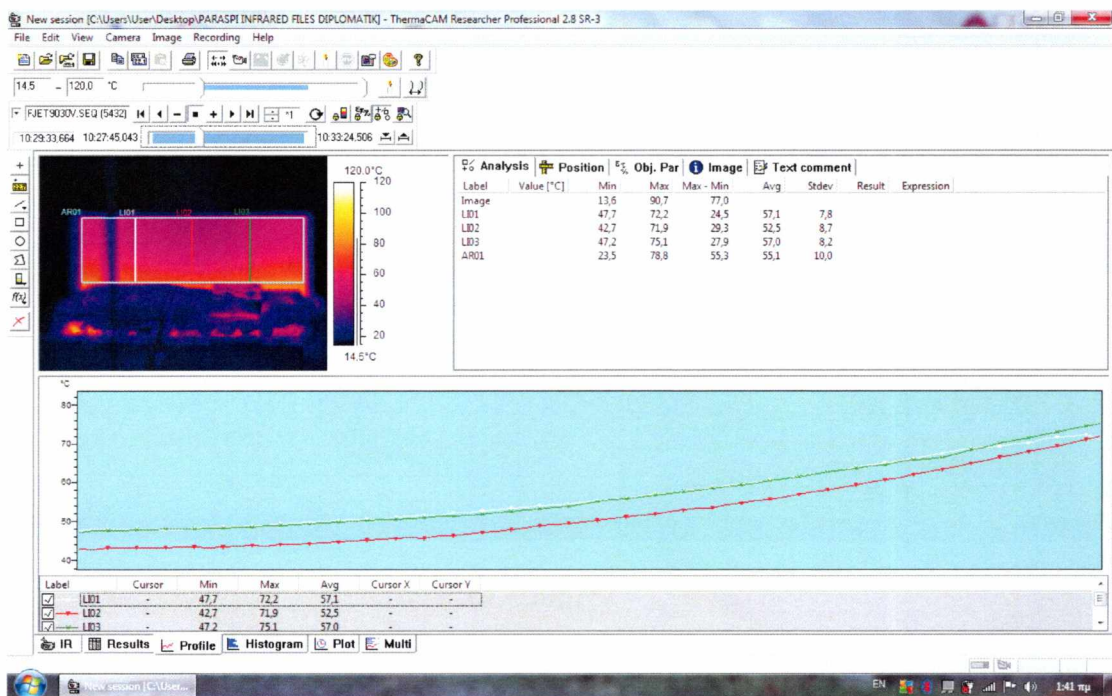
Σχήμα 5.17

Φαίνεται πως η ψύξη διαχέεται συμμετρικά αφού τα διαγράμματα της γραμμών 1 και 3 συμπίπτουν.

Στα παρακάτω σχήματα, μετά από 2 λεπτά, φαίνεται πως εξαπλώνεται η ψύξη όταν ο φυσητήρας είναι τοποθετημένος στις 90°. Βλέπουμε από τα χρώματα πως ο φυσητήρας ασκεί επιρροή σε όλη την επιφάνεια του πτερυγίου.

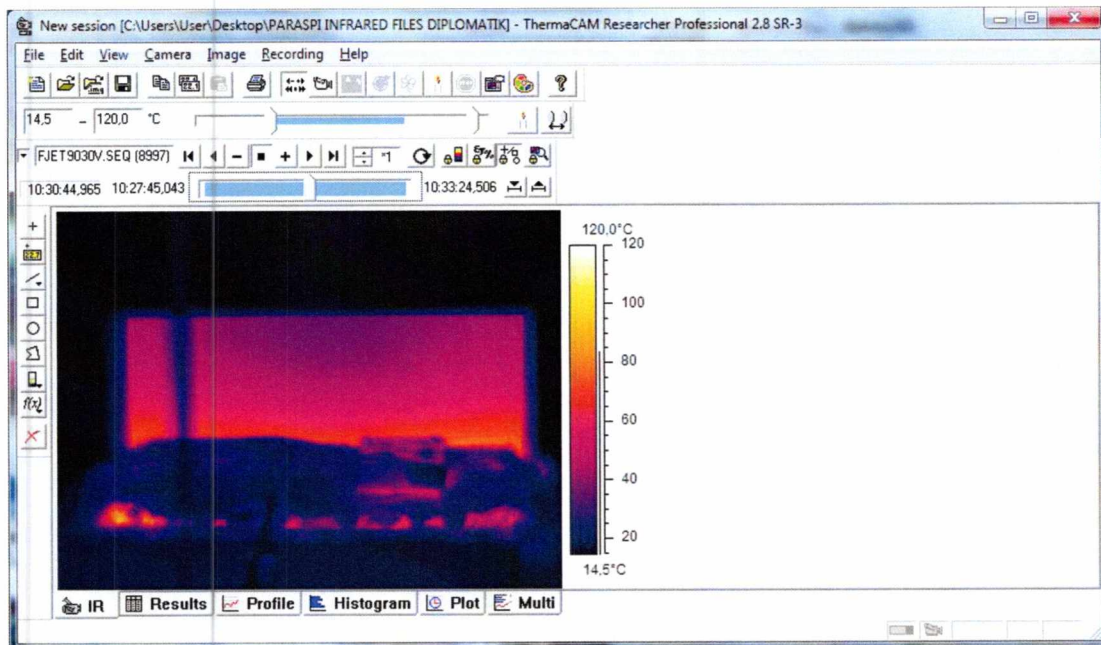


Σχήμα 5.18

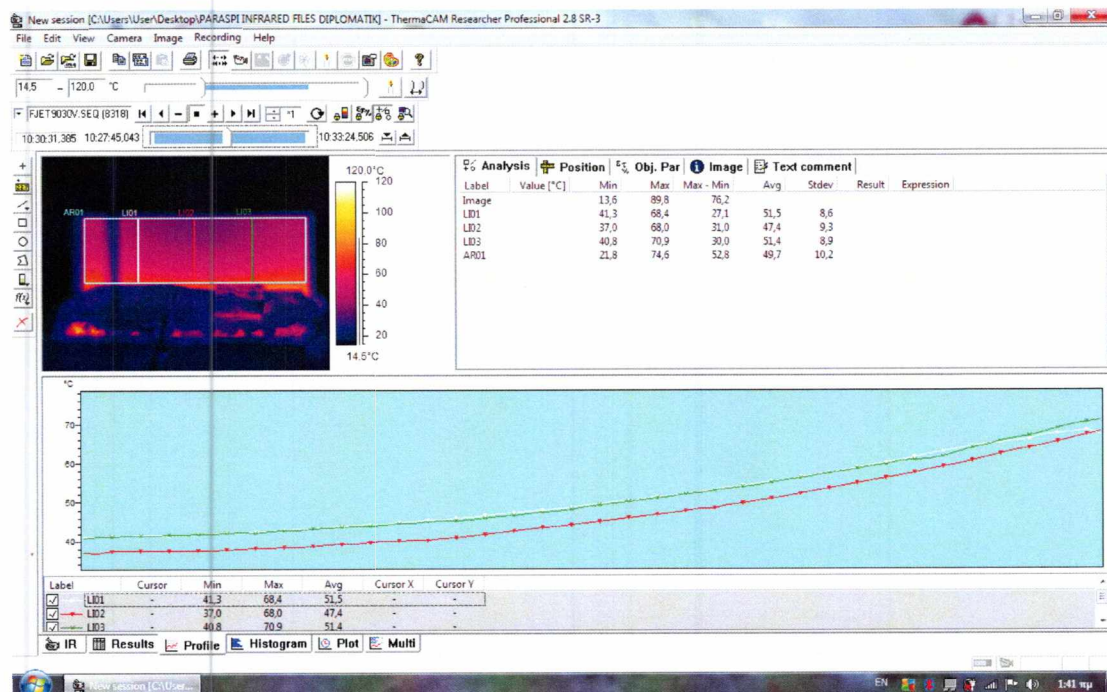


Σχήμα 5.19

Το μέγιστο αποτέλεσμα της επίδρασης του φυσητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε μεγάλη διαφορά σε σχέση με τη ψύξη στις 55° αφού πλέον ψύχεται ολόκληρη η πλάκα. Είμαστε στο 3ο λεπτό.

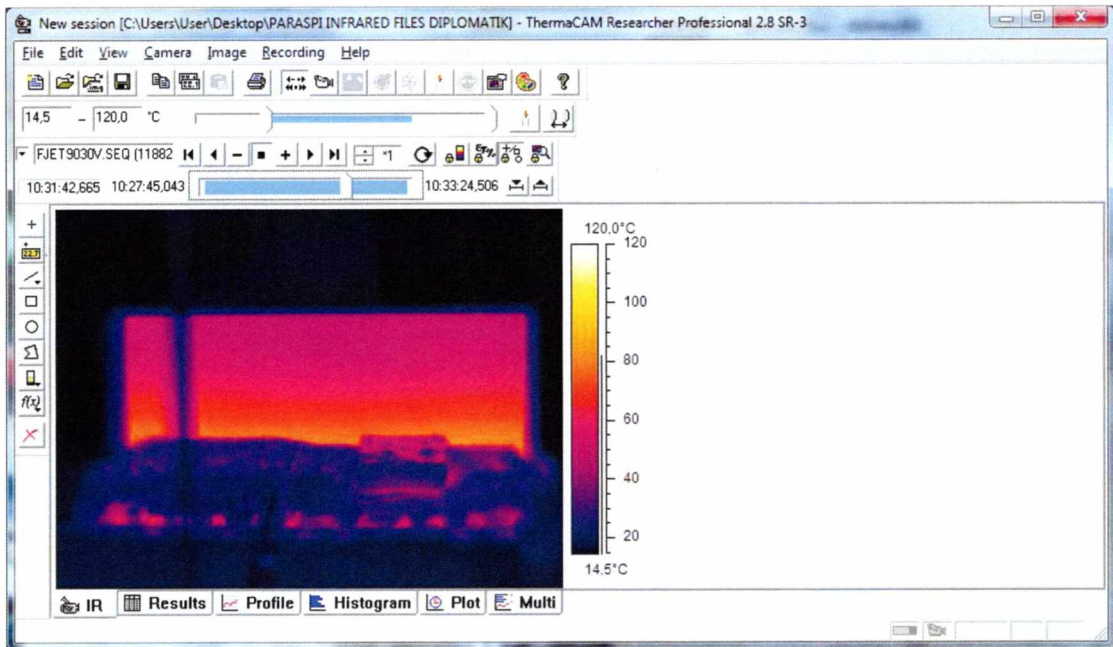


Σχήμα 5.20

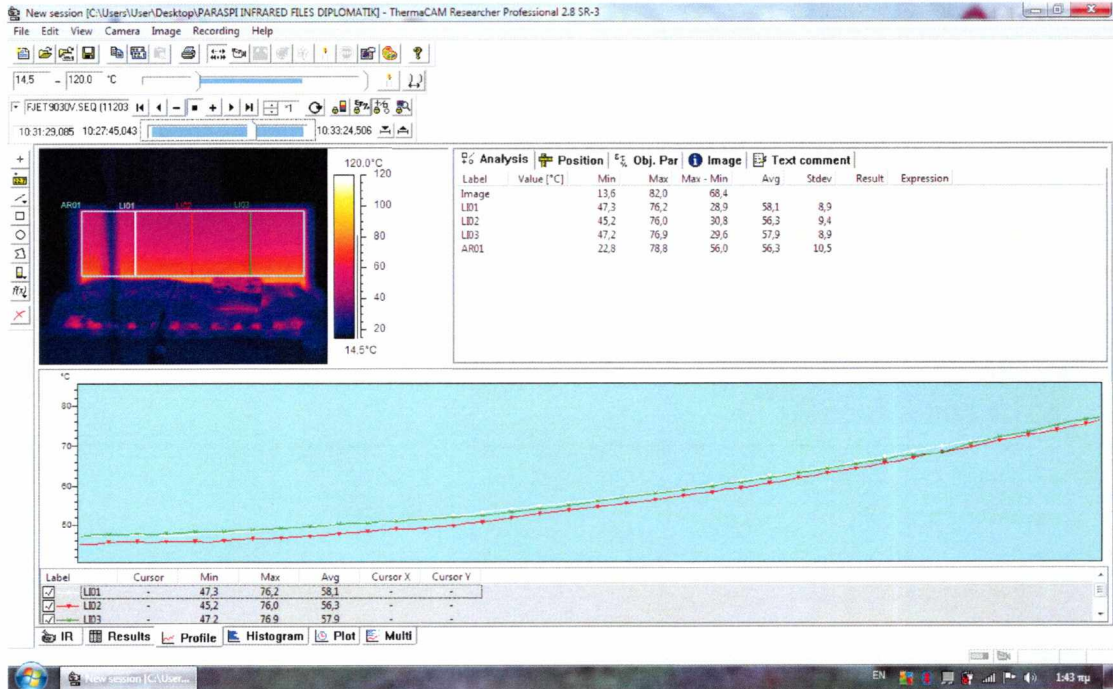


Σχήμα 5.21

Πλέον ο φυσητήρας έχει τεθεί εκτός λειτουργίας και στα τρία στιγμιότυπα που ακολουθούν παρατηρούμε την επαναφορά την θερμοκρασίας στα επίπεδα προ ψύξης.

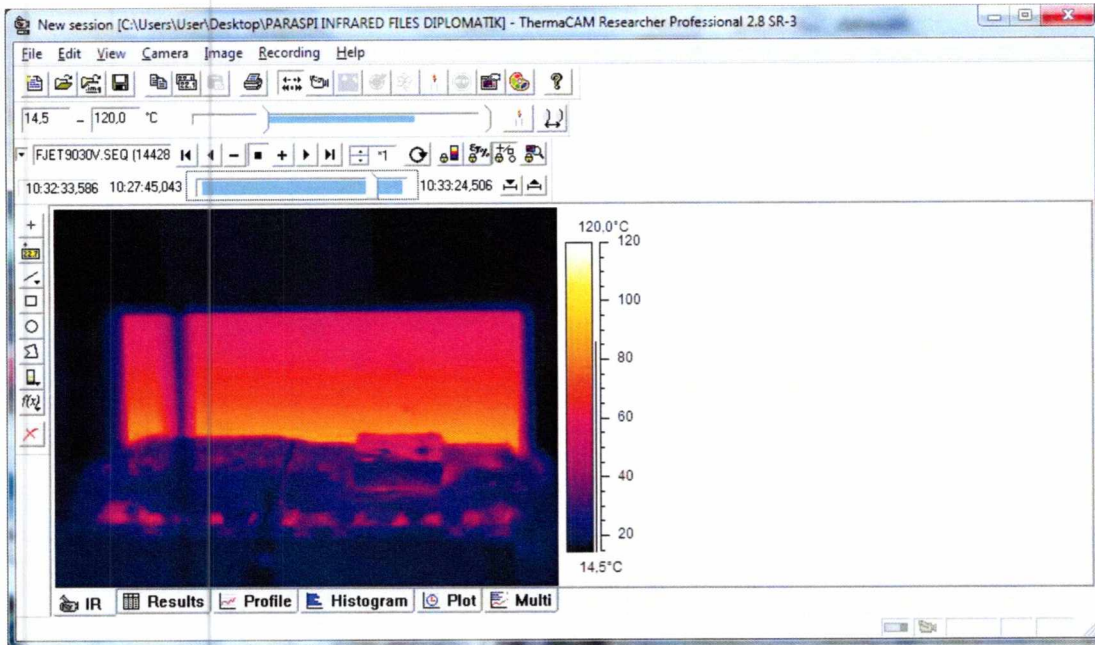


Σχήμα 5.22

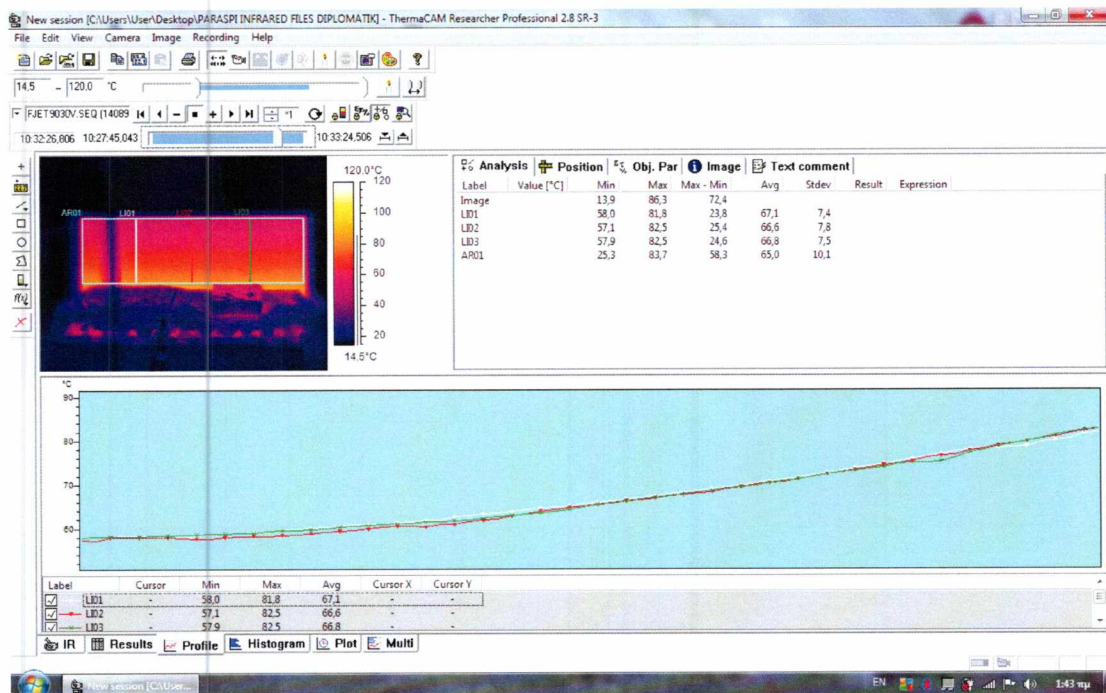


Σχήμα 5.23

Στιγμιότυπο στο 5ο λεπτό παρακάτω.



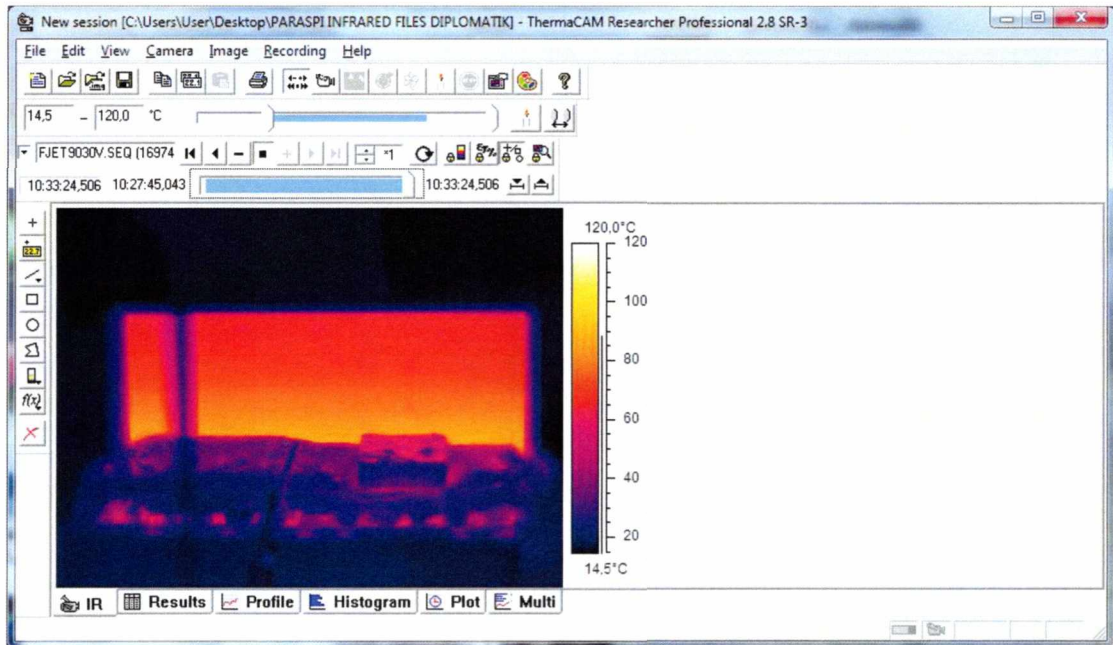
Σχήμα 5.24



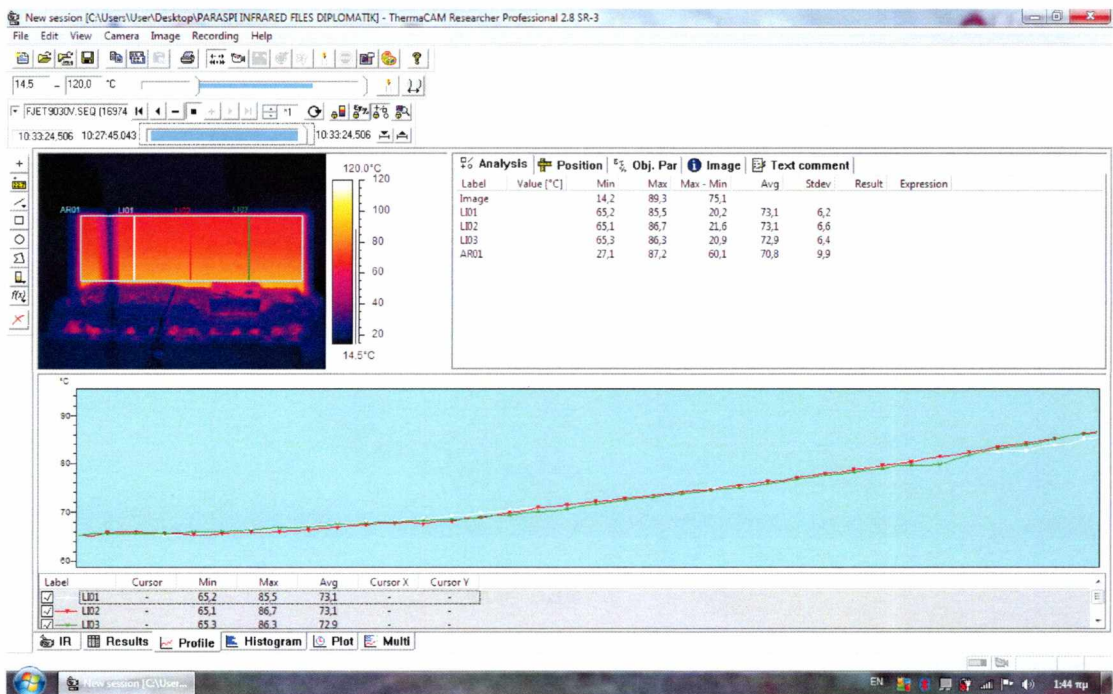
Σχήμα 5.25



Παρατηρούμε παρακάτω πως το περύγιο στο 6ο λεπτό έχει σχεδόν επανέλθει στην αρχική θερμοκρασία.

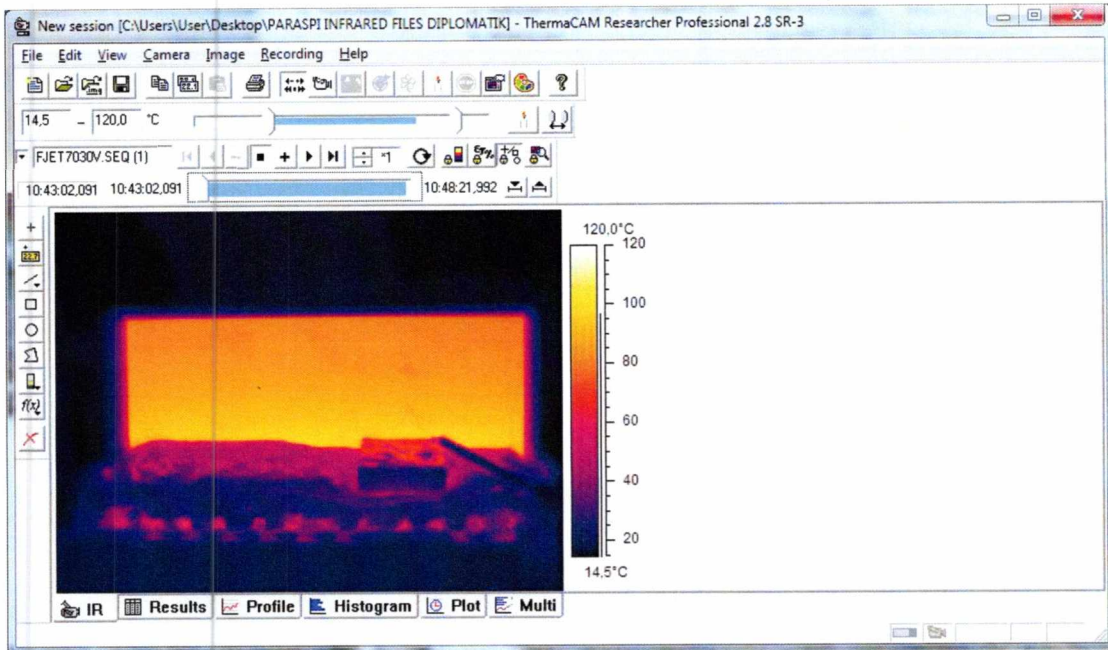


Σχήμα 5.26

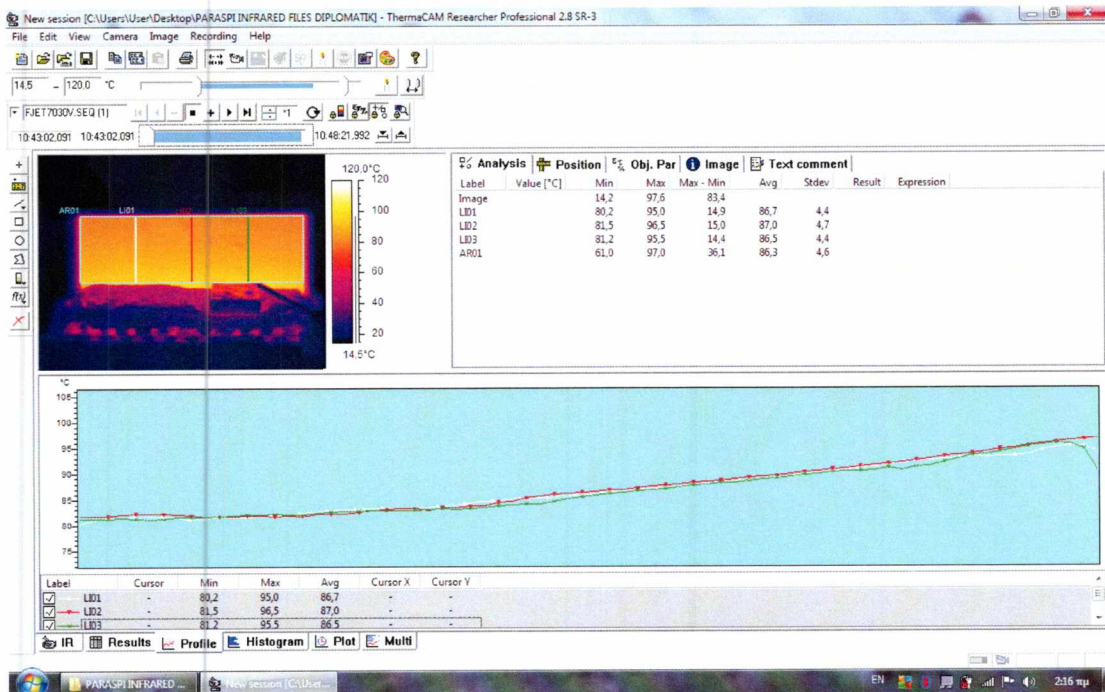


Σχήμα 5.27

Η τέταρτη μέτρηση έγινε με την γωνία πρόσκρουσης του φουσητήρα στις 70° και είχε διάρκεια 5 λεπτών. Ακολουθούν στιγμιότυπα ανά 1 λεπτό. Ο φουσητήρας εδώ τίθεται εκτός λειτουργίας στα 3 περίπου λεπτά.

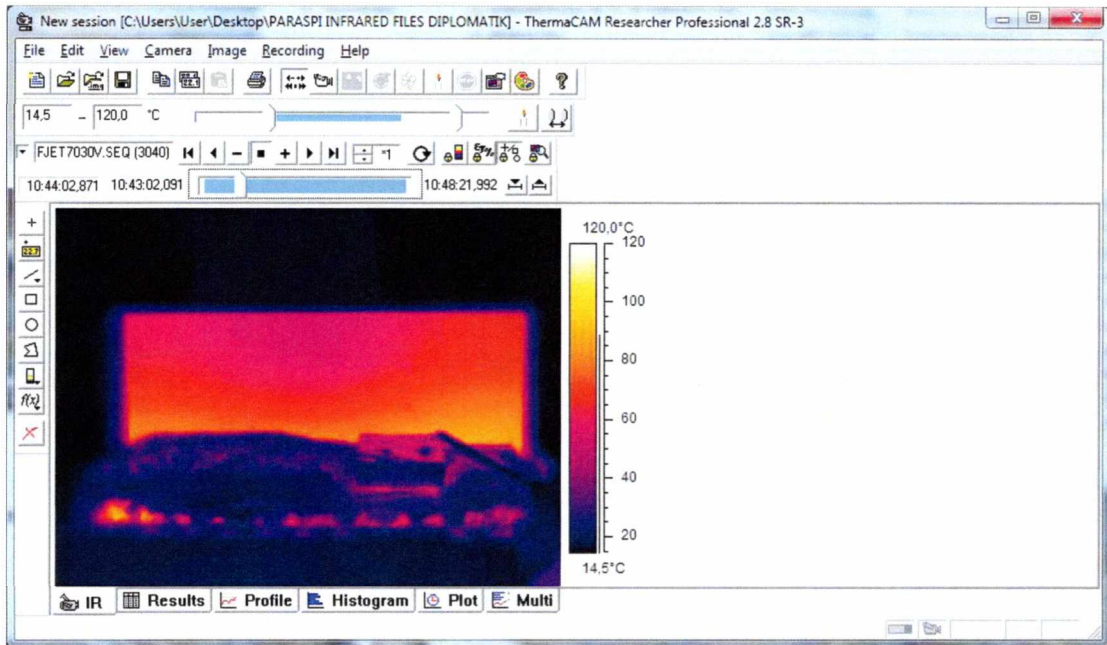


Σχήμα 5.28

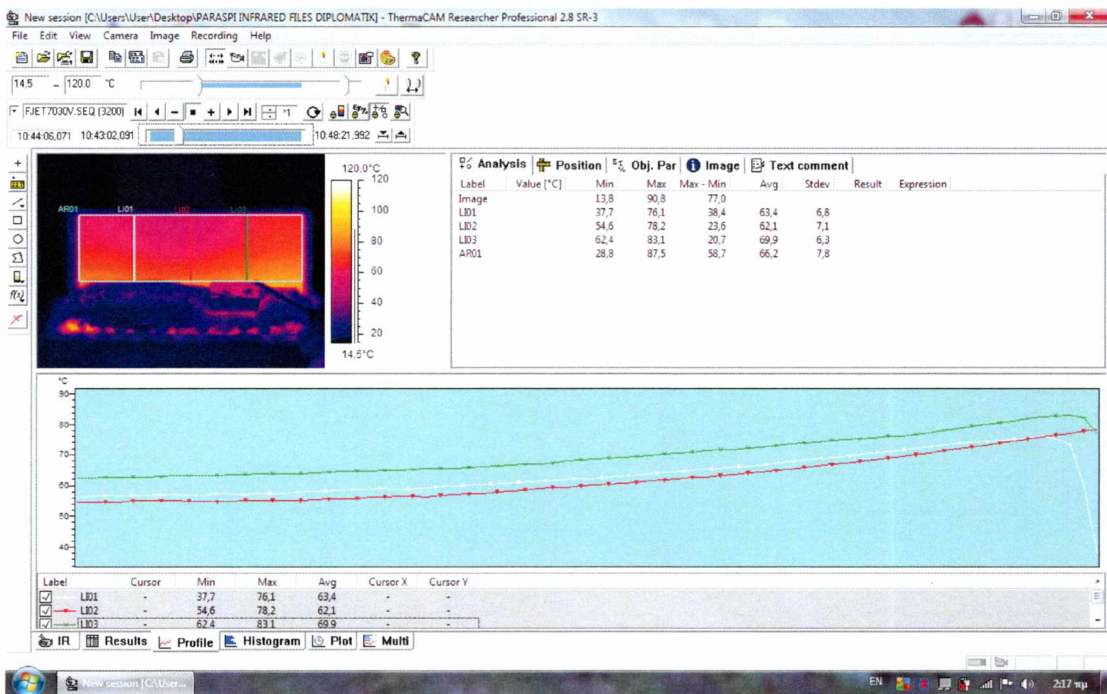


Σχήμα 5.29

Παρατηρούμε στις παρακάτω εικόνες στο 1ο λεπτό πως ξεκινά η ψύξη στις 70°. Βλέπουμε πως το φαινόμενο είναι ελαφρώς μετατοπισμένο αριστερά σε σχέση με την μέτρηση των 90°.

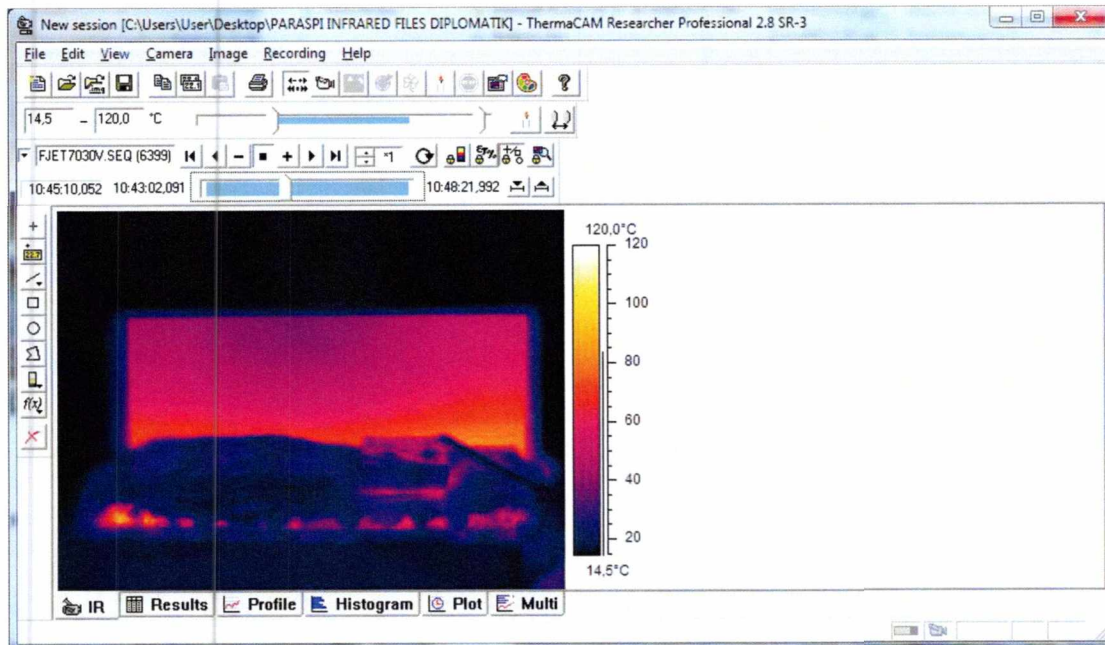


Σχήμα 5.30

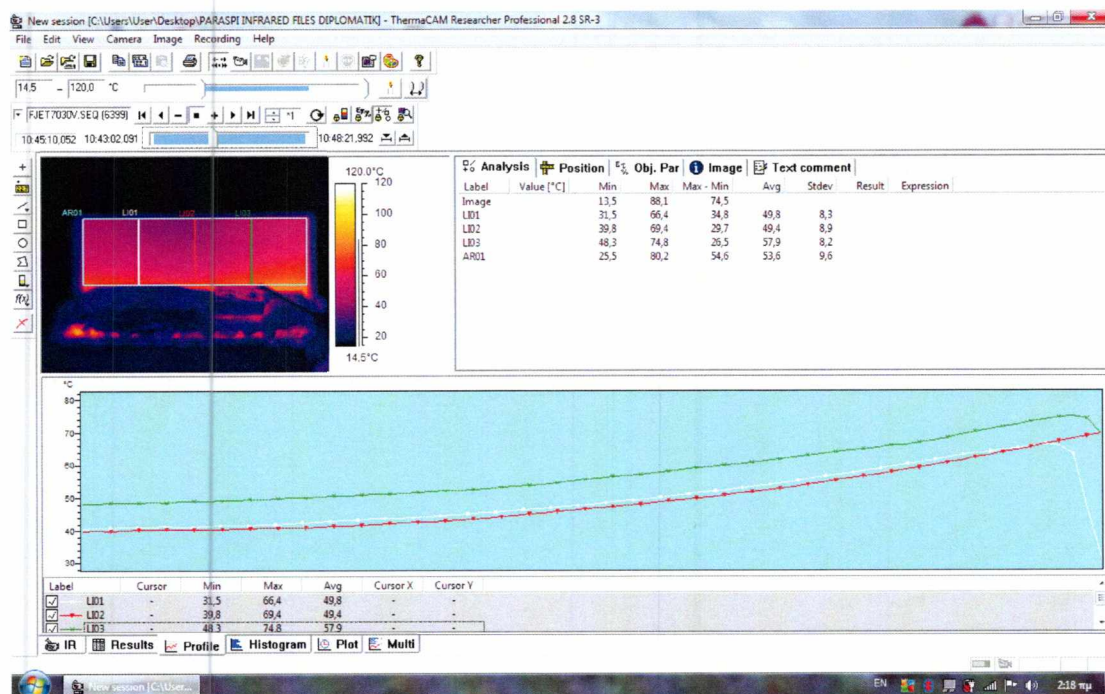


Σχήμα 5.31

Η εξάπλωση της ψύξης συμβαίνει και εδώ, στο 2ο λεπτό, σχεδόν σε όλη την επιφάνεια του περυσίου, εκτός μίας μικρής επιφάνεια κάτω δεξιά. Περισσότερο επηρεάζεται το κεντρικό και αριστερό κομμάτι του περυσίου όπως βλέπουμε και στα διαγράμματα.

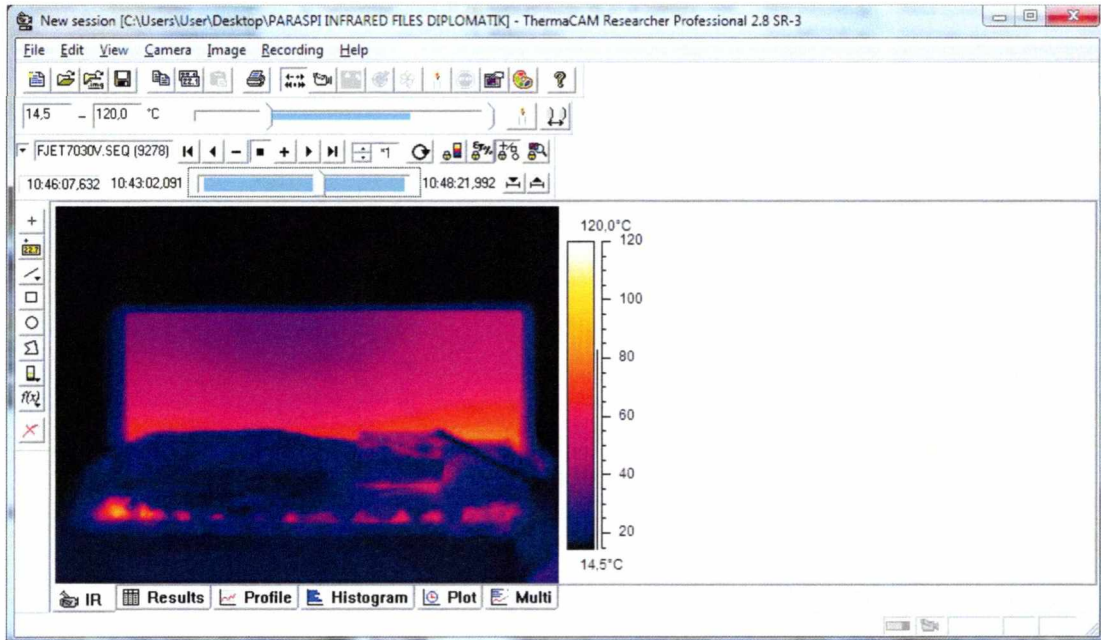


Σχήμα 5.32

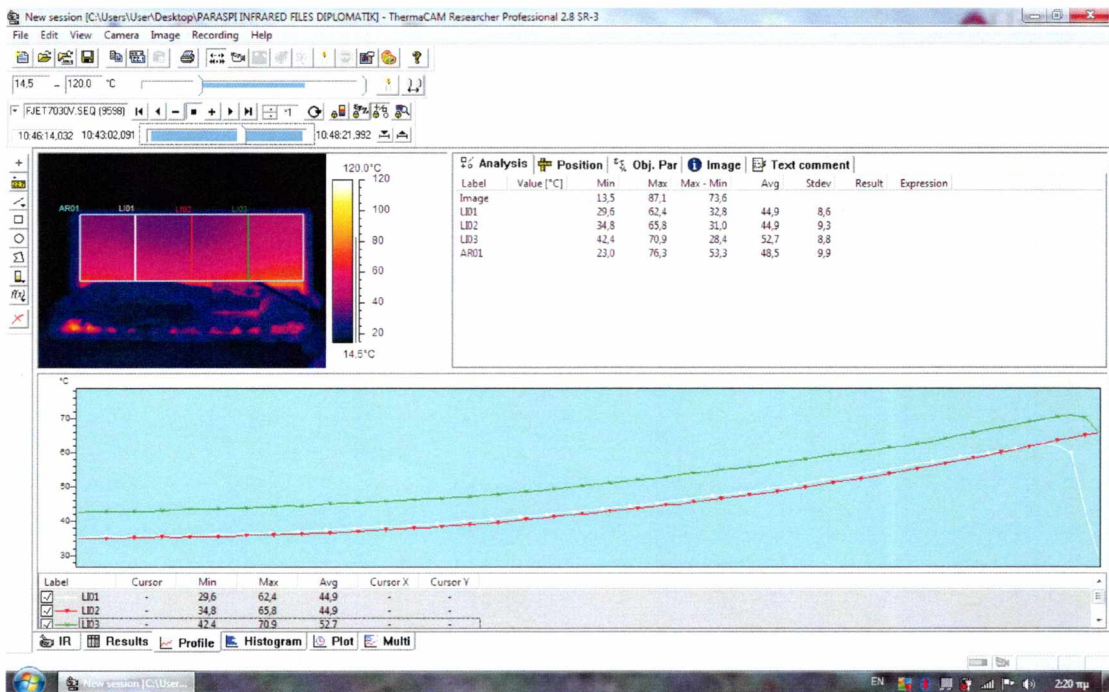


Σχήμα 5.33

Στο παρακάτω στιγμιότυπο στο 3ο λεπτό βλέπουμε την μέγιστη επιρροή του φυσητήρα στο περύγιο. Το κομμάτι κάτω δεξιά του περυνγίου εξακολουθεί μην επηρεάζεται από την δέσμη αέρα. Η συμπεριφορά του περυνγίου στην γραμμή 1 και 2 είναι όμοια.

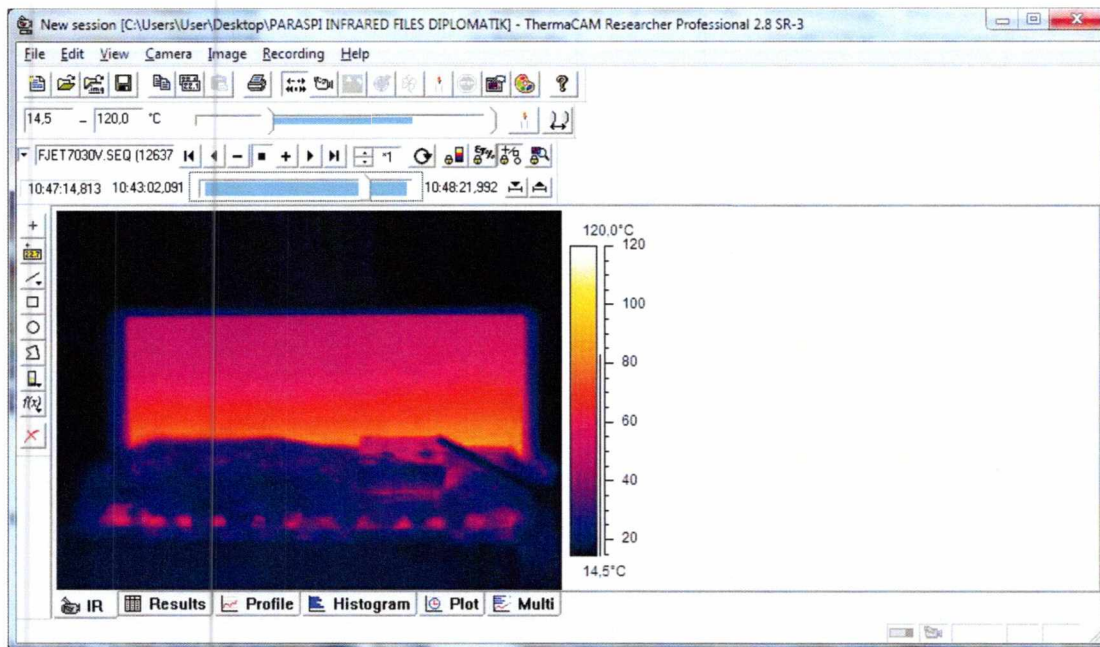


Σχήμα 5.34

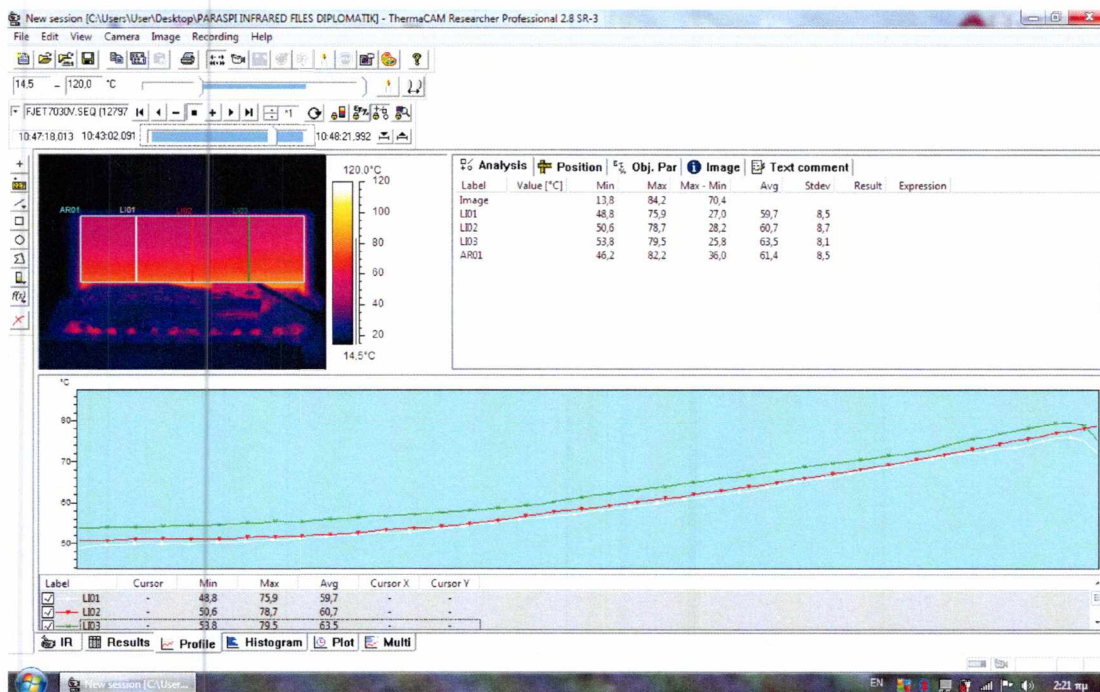


Σχήμα 5.35

Στα επόμενα δύο στιγμιότυπα 4ο και 5ο λεπτό παρακολουθούμε την θερμοκρασία να επανέρχεται στα επίπεδα προ ψύξης αφού ο φυσητήρας έχει τεθεί εκτός λειτουργίας. Στιγμιότυπο για το 4ο λεπτό παρακάτω.

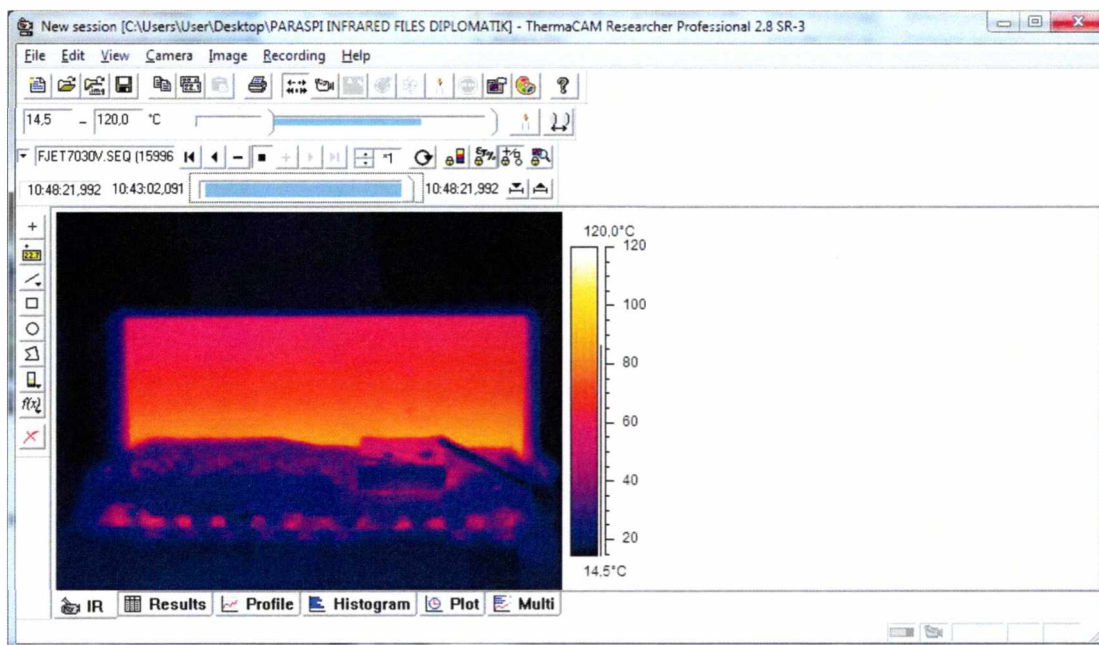


Σχήμα 5.36

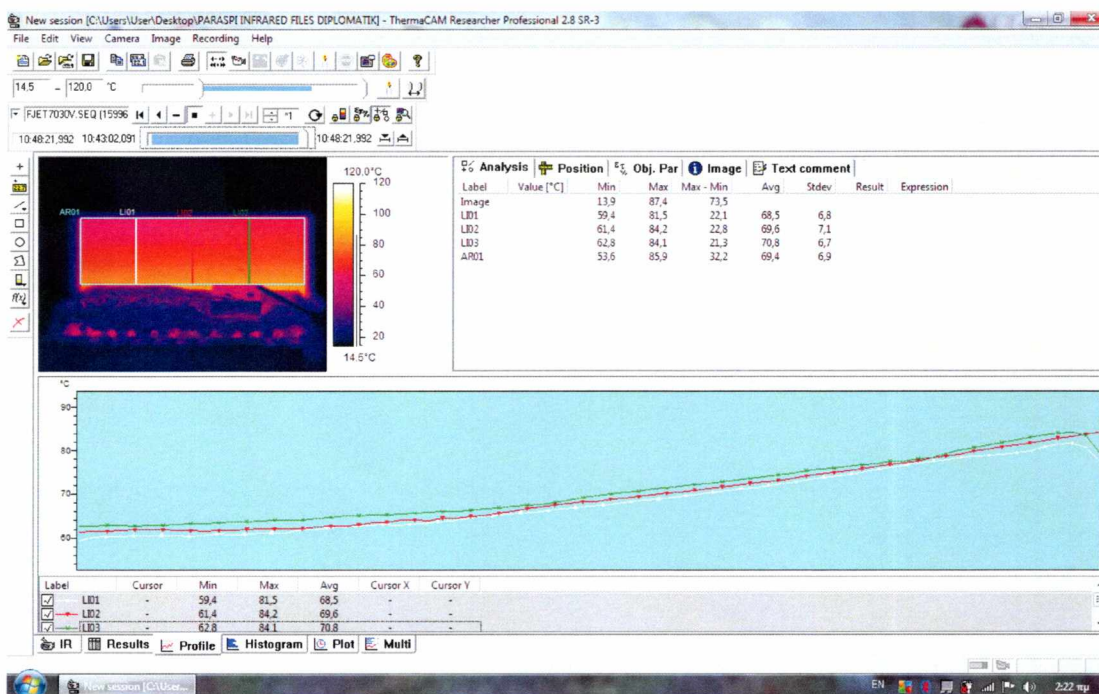


Σχήμα 5.37

Και το στιγμιότυπο για το 5ο λεπτό. Η θερμοκρασία έχει σχεδόν επανέλθει και τα διαγράμματα τείνουν να συμπίσουν.

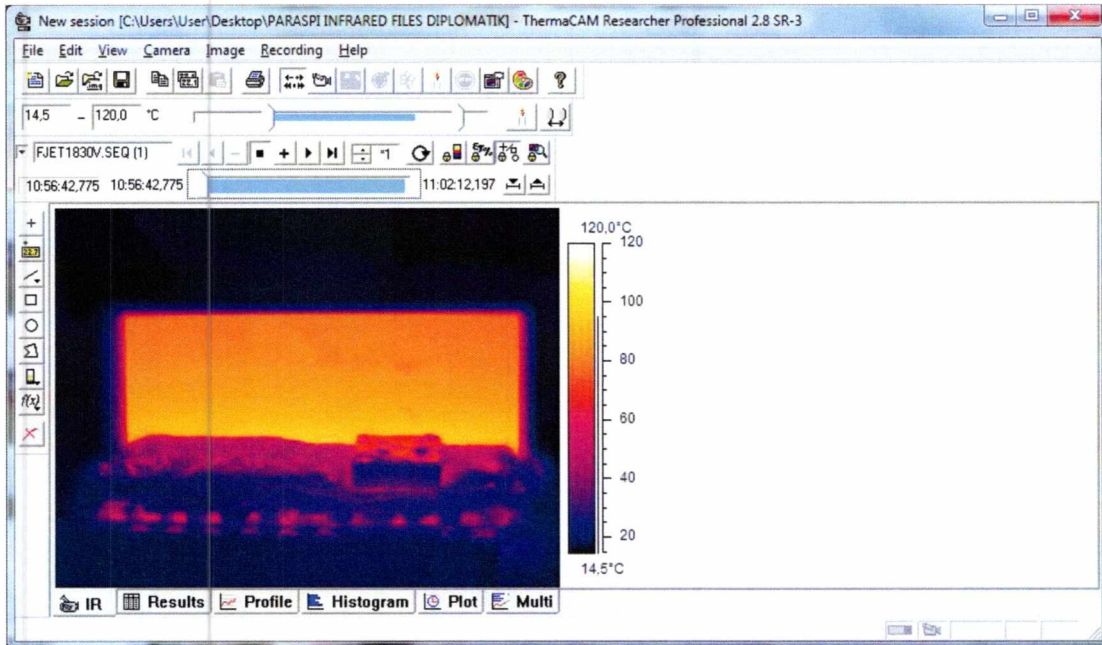


Σχήμα 5.38

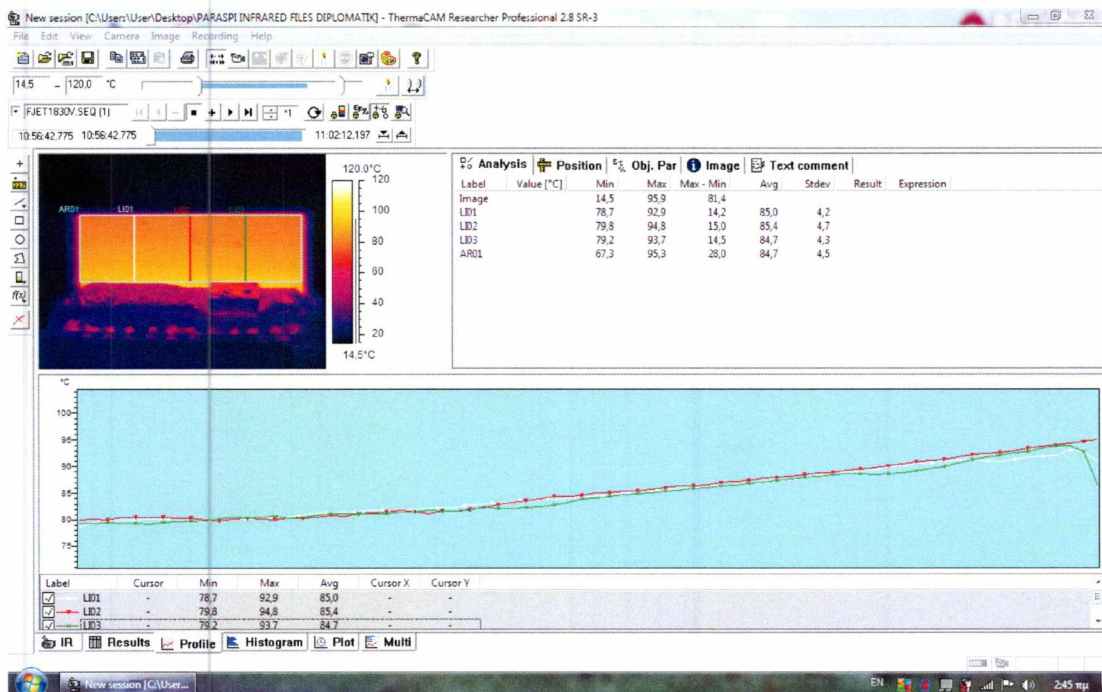


Σχήμα 5.39

Η πέμπτη μέτρηση είναι και η τελευταία που έγινε με χρήση φουσητήρα δέσμης αέρος. Η γωνία πρόσκρουσης του αέρα είναι  $18^\circ$  και το βίντεο έχει διάρκεια 5 λεπτών. Στο 3ο λεπτό σταματά η λειτουργία του φουσητήρα. Τα στιγμιότυπα λαμβάνονται ανά 1 λεπτό.



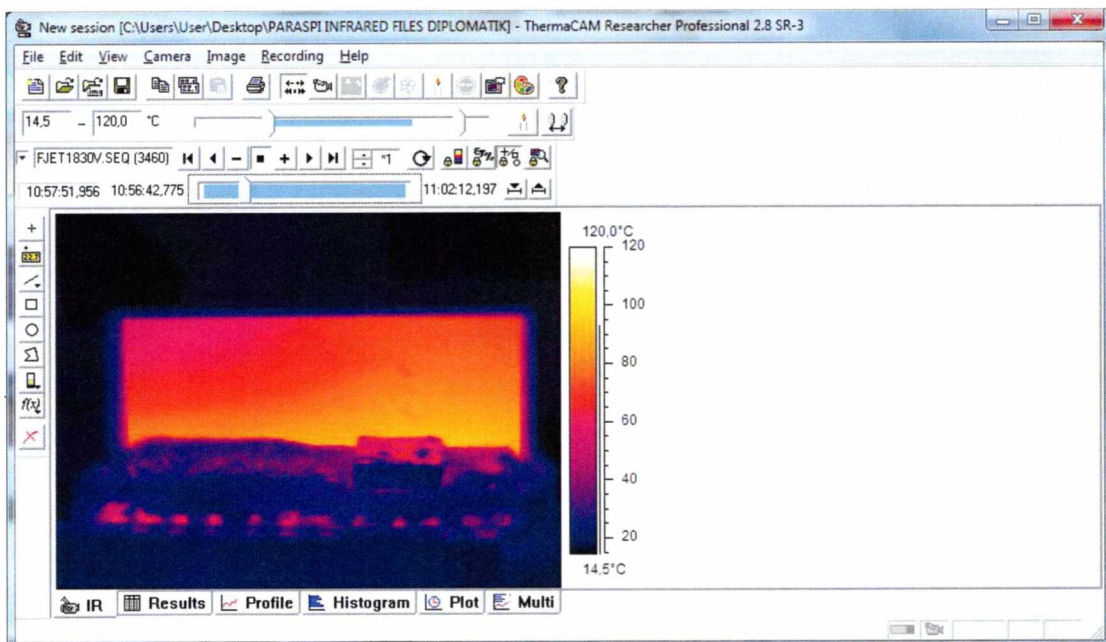
Σχήμα 5.40



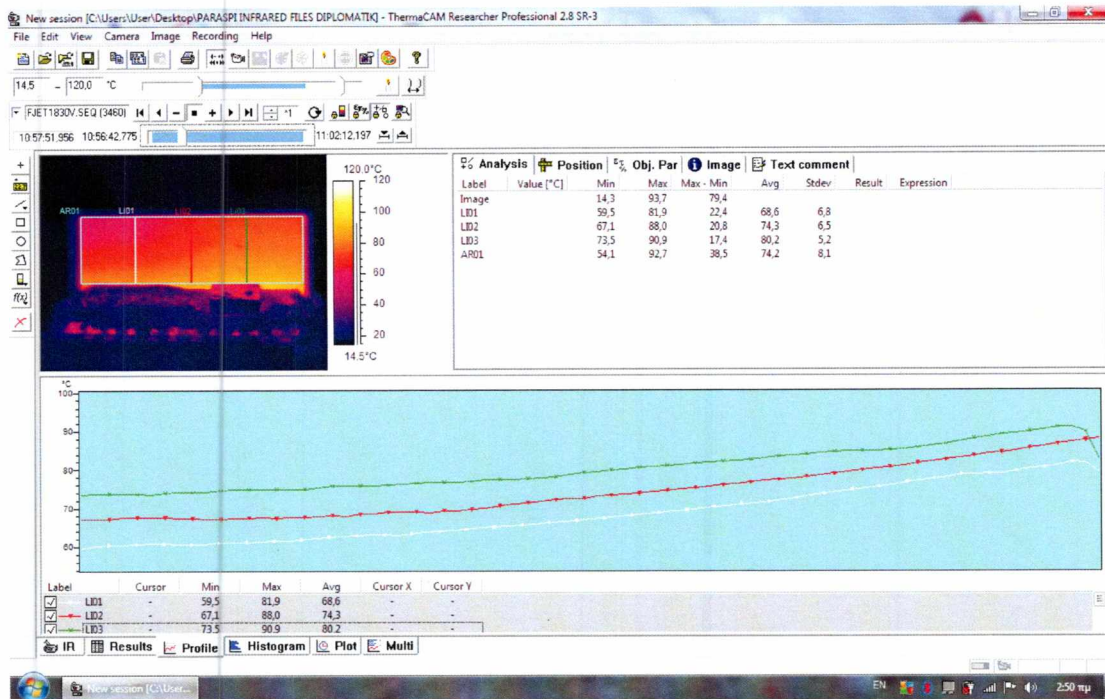
Σχήμα 5.41



Παρατηρούμε στα παρακάτω σχήματα στο 1ο λεπτό πως αρχίζει να εξαπλώνεται η ψύξη από πάνω αριστερά στο περύγιο. Η επίδραση του φουσητήρα στις 18° είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με όλες τις άλλες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, με πιο κοντινή να είναι αυτή στις 55°. Βλέπουμε πως το μεγαλύτερο κομμάτι του περυνγίου, η δεξιά μεριά του δηλαδή, επηρεάζεται λιγότερο από την λειτουργία του φουσητήρα.

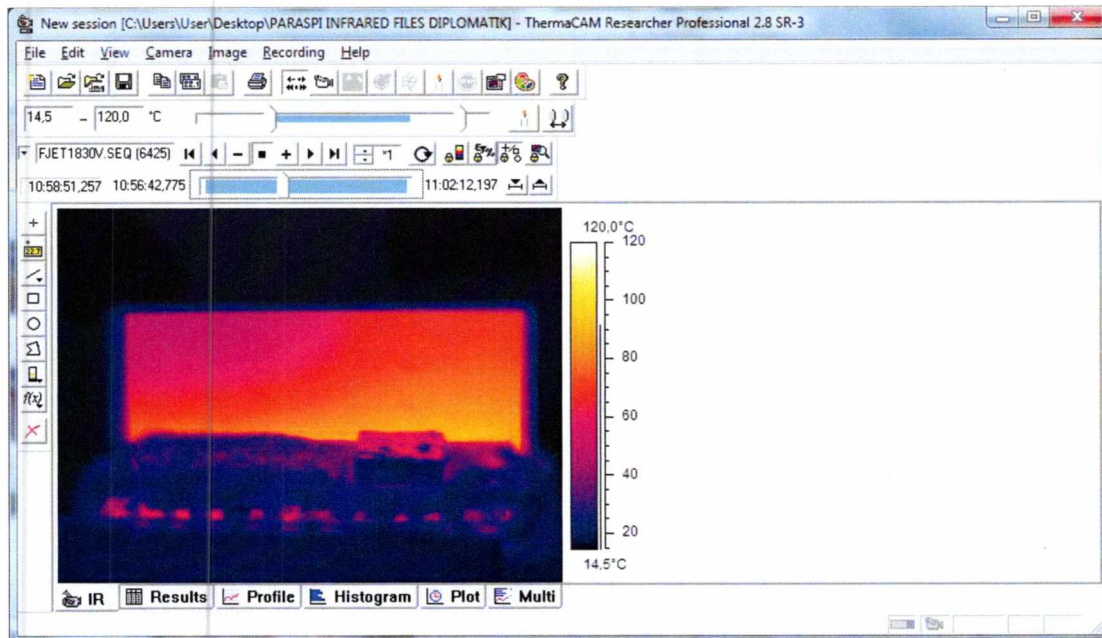


Σχήμα 5.42

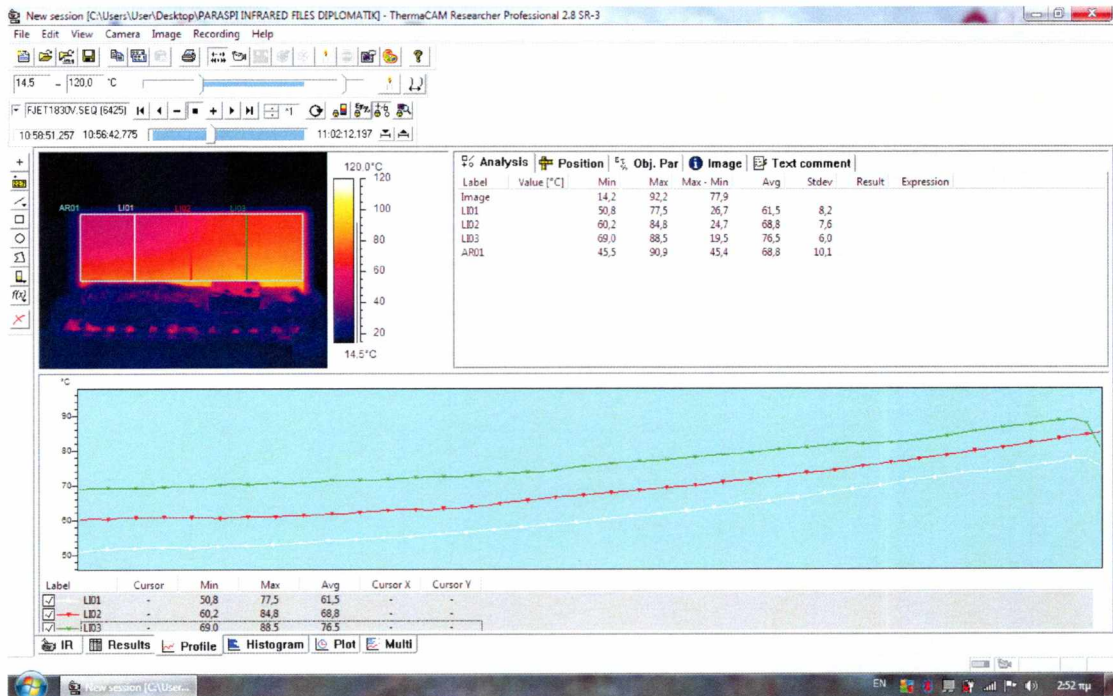


Σχήμα 5.43

Βλέπουμε στο 2ο λεπτό πως το φαινόμενο συμβαίνει κυρίως πάνω αριστερά. Όλες οι γραμμές μας πλέον διατηρούν διαφορετικές θερμοκρασίες.

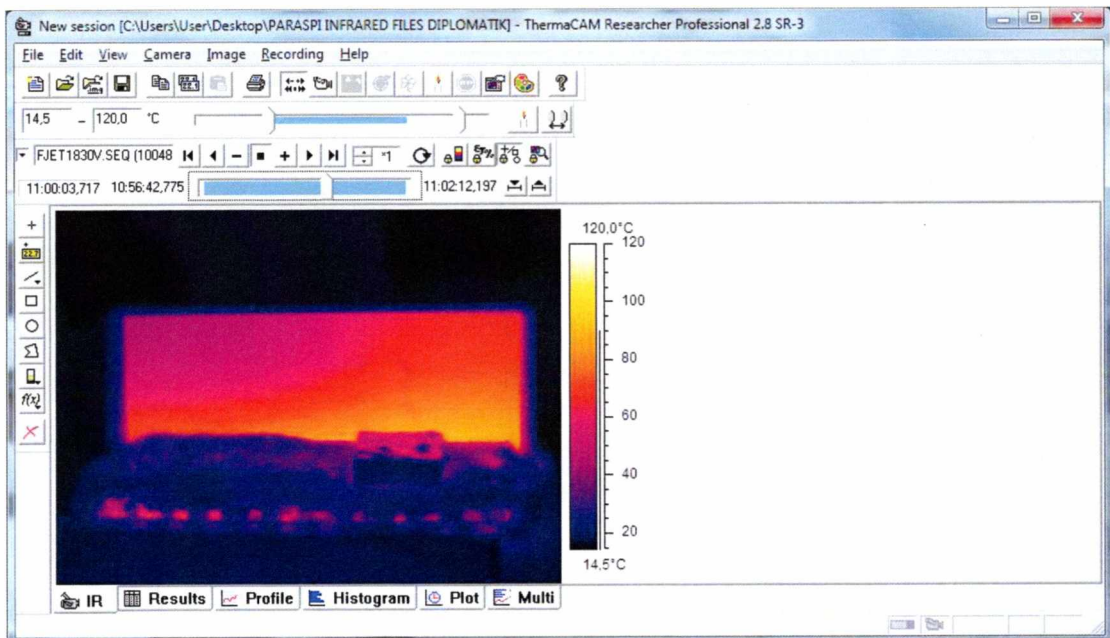


Σχήμα 5.44

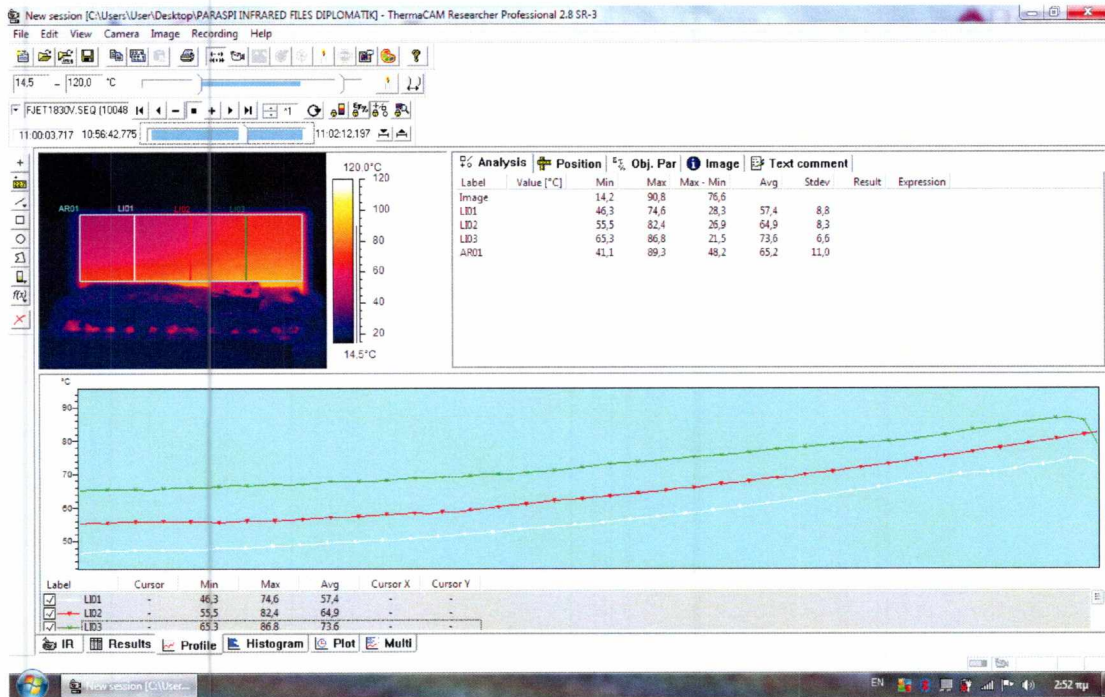


Σχήμα 5.45

Το παρακάτω στιγμιότυπο στο 3ο λεπτό μας δείχνει την μέγιστη επιρροή του φυσητήρα στο περύγιο. Εξακολουθεί το μεγαλύτερο μέρος του να μένει ανεπηρέαστο από την δέσμη αέρα στις 18°.



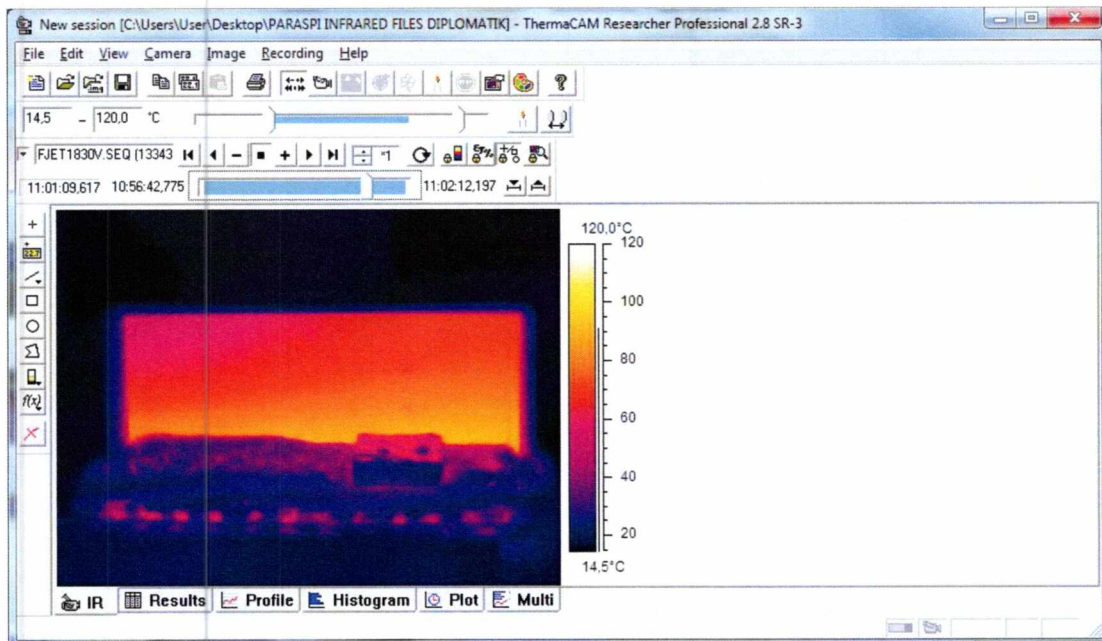
Σχήμα 5.46



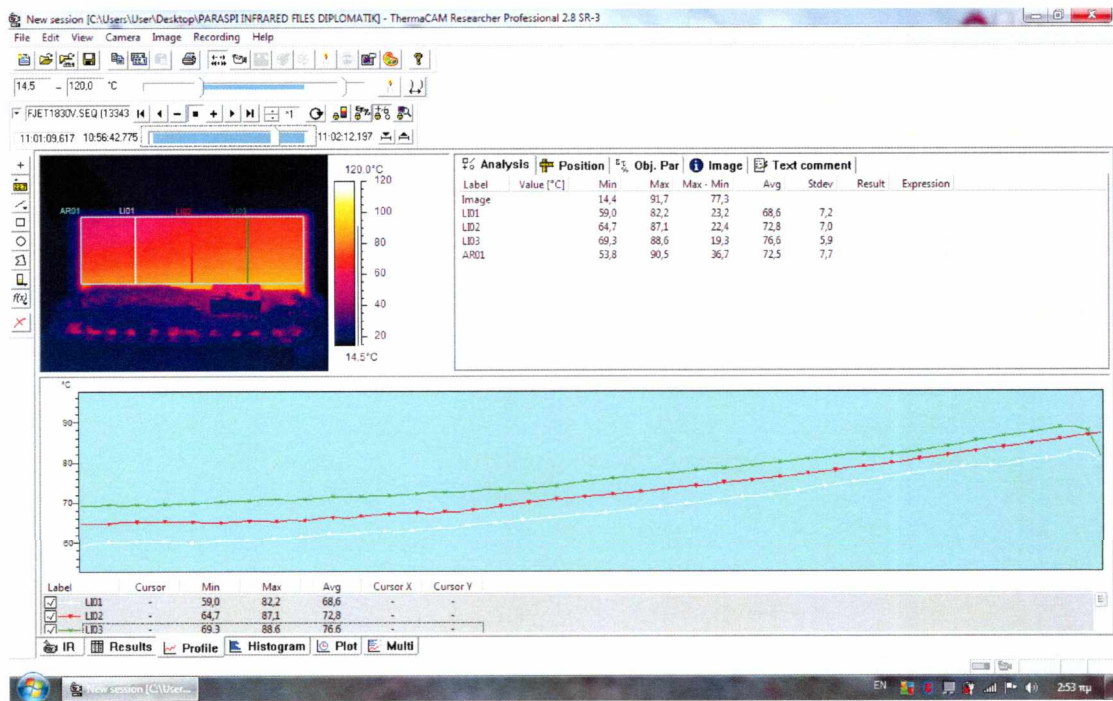
Σχήμα 5.47

Στα δύο στιγμιότυπα που ακολουθούν στο 4ο και 5ο λεπτό ο φυσητήρας έχει σταματήσει και το περύγιο επαναφέρεται σε αρχική θερμοκρασία.

Παρακάτω για το 4ο λεπτό.

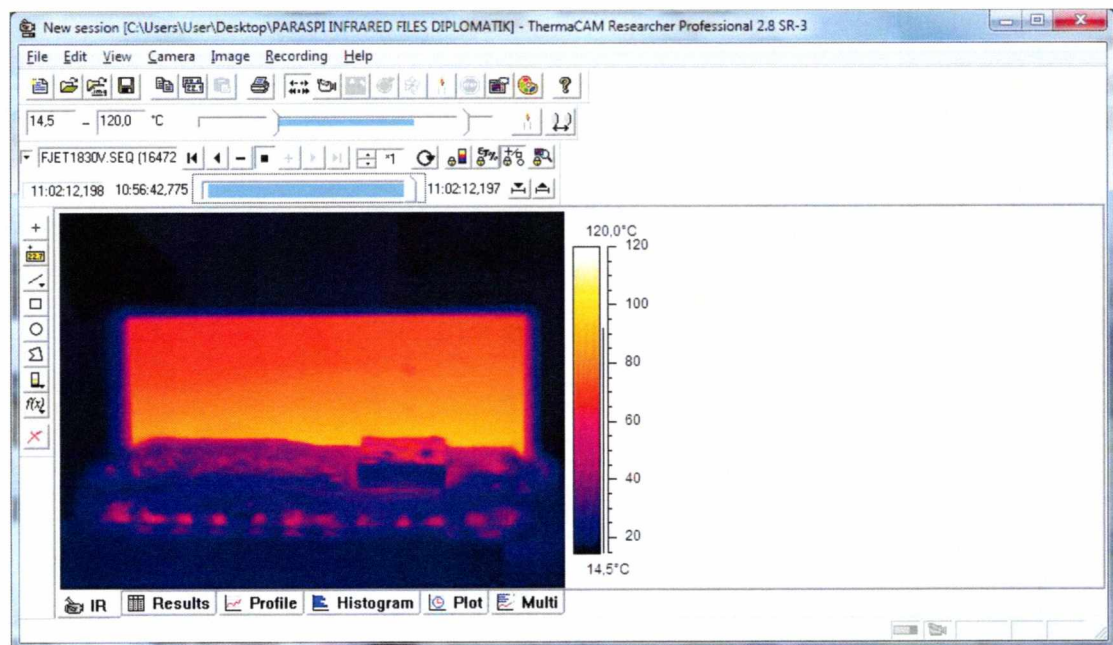


Σχήμα 5.48

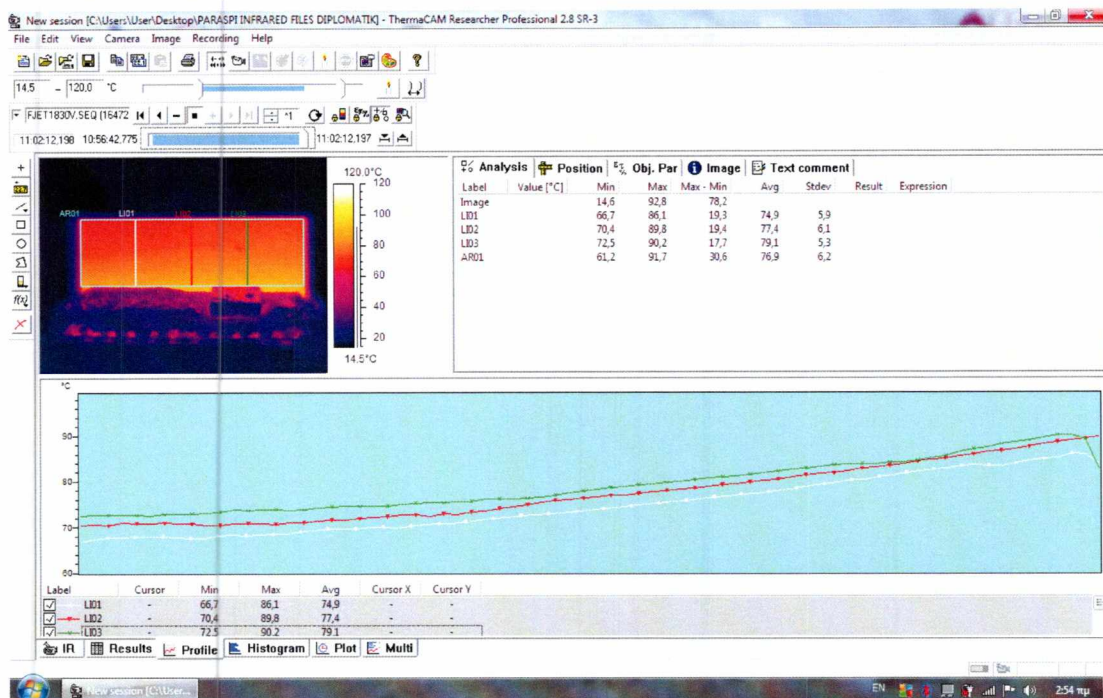


Σχήμα 5.49

Στο 5ο λεπτό η θερμοκρασία πλησιάζει σε αρχικά επίπεδα όπως φαίνεται από το χρώμα του πτερυγίου και από τα διαγράμματα που πλησιάζουν μεταξύ τους.



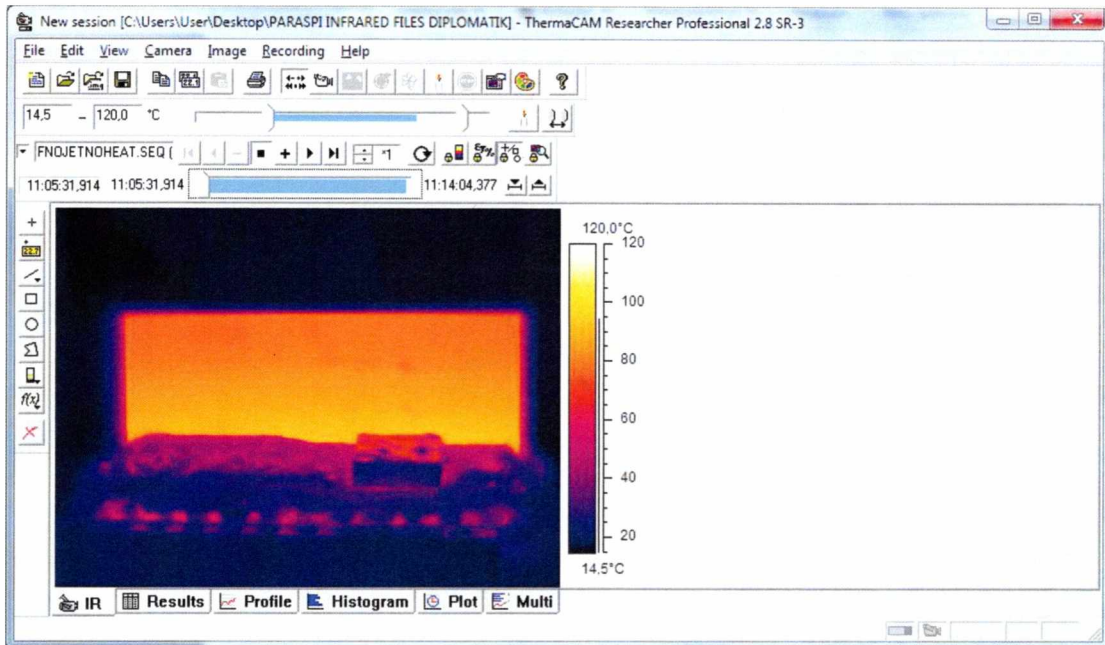
Σχήμα 5.50



Σχήμα 5.51

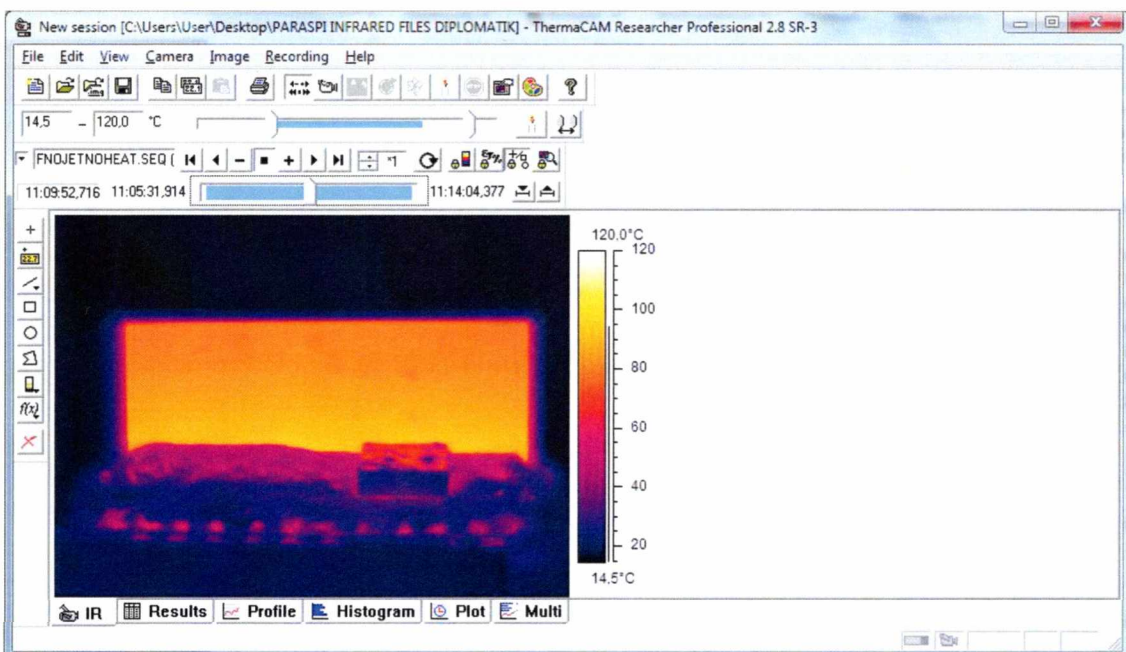
Η τελική μέτρηση που πραγματοποιήθηκε με την χρήση της θερμικής κάμερας έγινε χωρίς φυσητήρα αέρος και δίχως σύνδεση της διάταξης σε τροφοδοτικό ρεύματος. Η μέτρηση αυτή ξεκίνησε 5 λεπτά αφότου ολοκληρώθηκαν οι μετρήσεις με τον φυσητήρα. Την στιγμή που αποσυνδέθηκε το τροφοδοτικό τάσης άρχισε και η λήψη του τελευταίου βίντεο το οποίο είχε διάρκεια 9 λεπτών. Σκοπός του βίντεο αυτού ήταν η αποτύπωση του ρυθμού αποβολής θερμότητας του περυνγίου έστω και σε ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα. Εδώ θα δοθούν τρία στιγμιότυπα, ένα στην αρχή, ένα στη μέση και ένα στο τέλος μετά από 9 λεπτά. Η διαφορά τους είναι ελάχιστη και το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι δεν έχουμε εξαναγκασμένη συναγωγή. Σε αυτήν την περίπτωση δεν έγιναν διαγράμματα αφού οι διαφορές μεταξύ των εικόνων είναι απειροελάχιστες.

Το στιγμιότυπο στην αρχή είναι το παρακάτω.



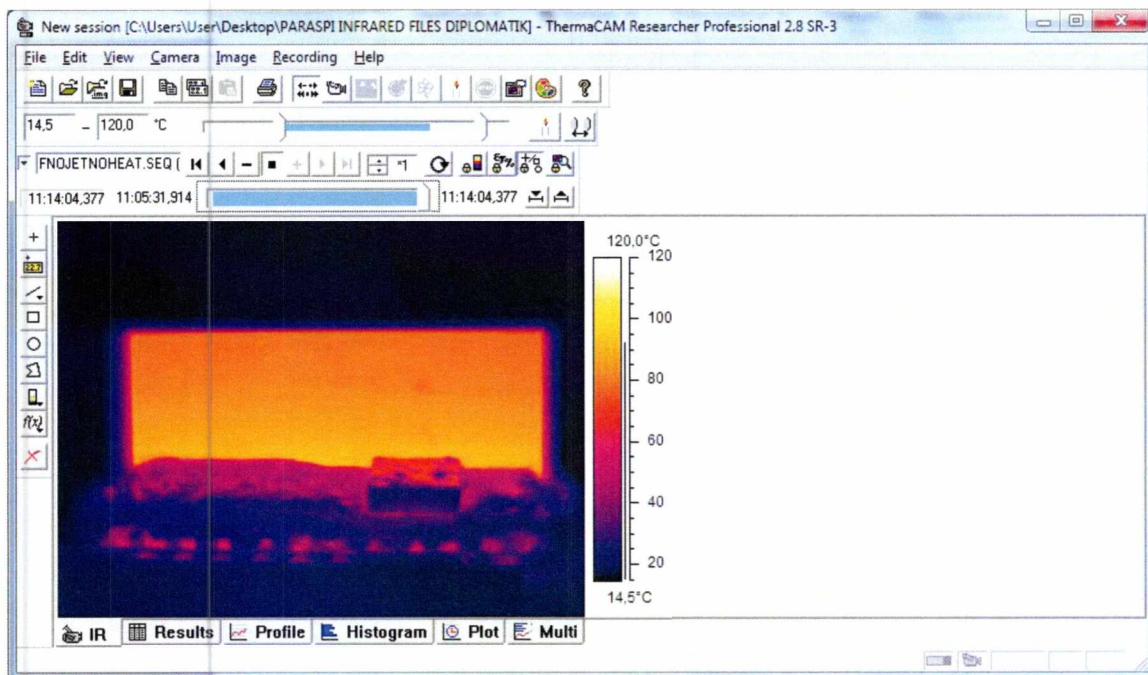
Σχήμα 5.52

Το στιγμιότυπο που ακολουθεί είναι μετά από 4.5 λεπτά από την στιγμή που αποσυνδέθηκε το τροφοδοτικό. Καμία ουσιαστική αλλαγή δεν παρατηρείται. Ο ρυθμός ψύξης με ελεύθερη συναγωγή είναι πάρα πολύ μικρός.



Σχήμα 5.53

Παρακάτω είναι το τελευταίο στιγμιότυπο μετά από 9 λεπτά. Επίσης δεν παρατηρείται καμία διαφορά με τα προηγούμενα στιγμιότυπα.

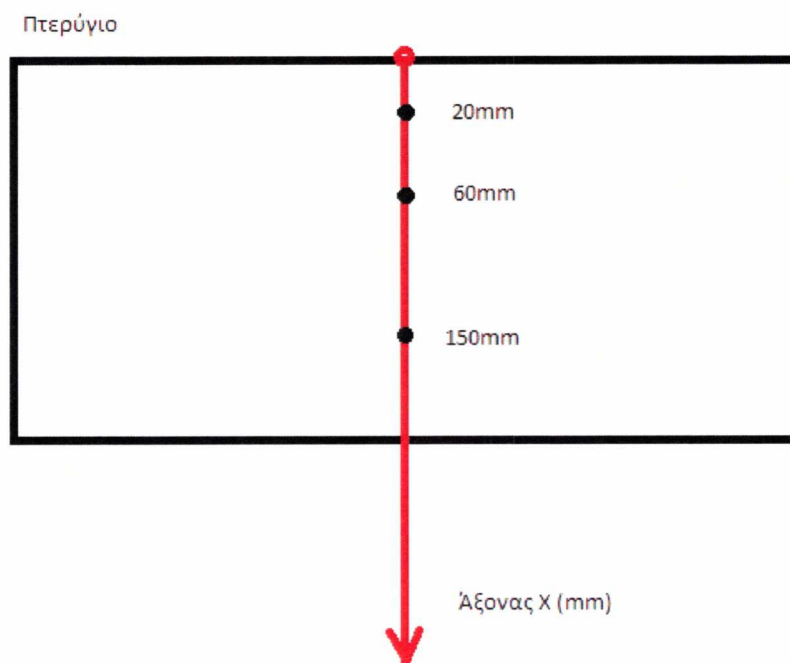


Σχήμα 5.54



## 5.2 Αποτελέσματα 2ου πειράματος (θερμοστοιχεία)

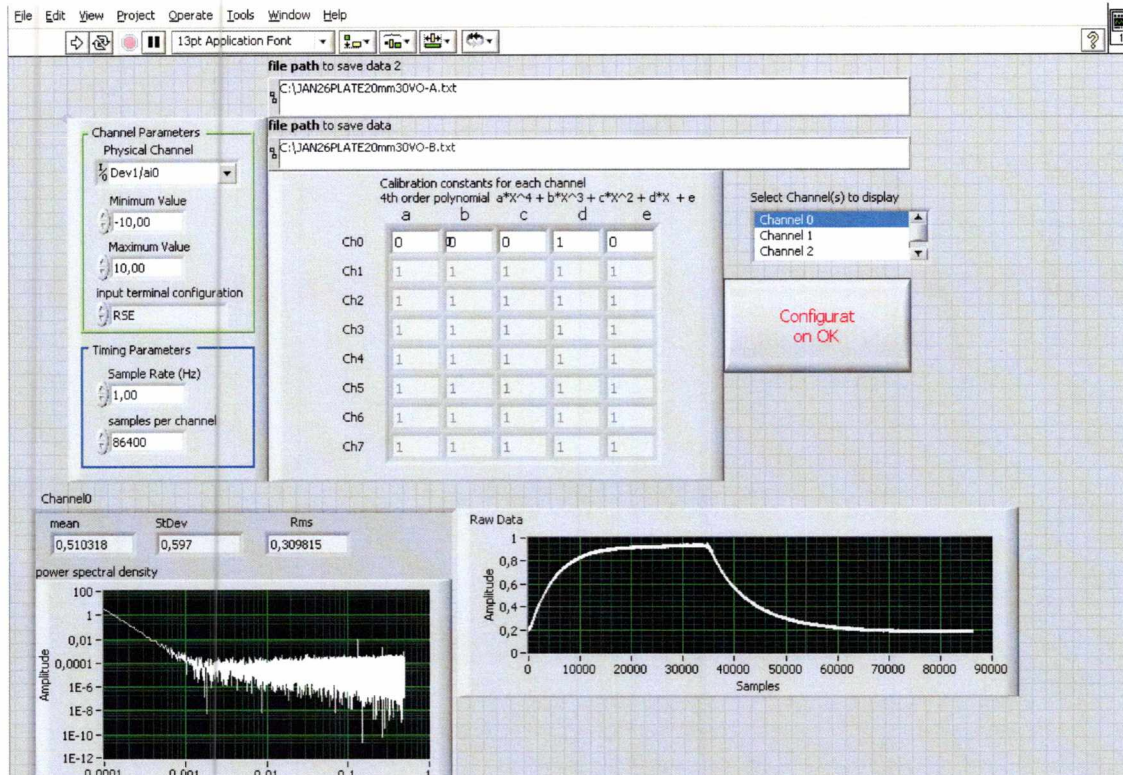
Στο δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε έγινε χρήση των θερμοστοιχείων του πτερυγίου. Η συνδεσμολογία συνδεόταν με τροφοδοσία ρεύματος 30 Volt μέχρι να φτάσει σε σταθεροποιημένη μέγιστη θερμοκρασία και έπειτα αποσυνδεόταν έτσι ώστε να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Σε αυτό το πείραμα έγιναν τρεις μετρήσεις στο κέντρο του πτερυγίου σε διαφορετικά ύψη που φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Σχήμα 5.55

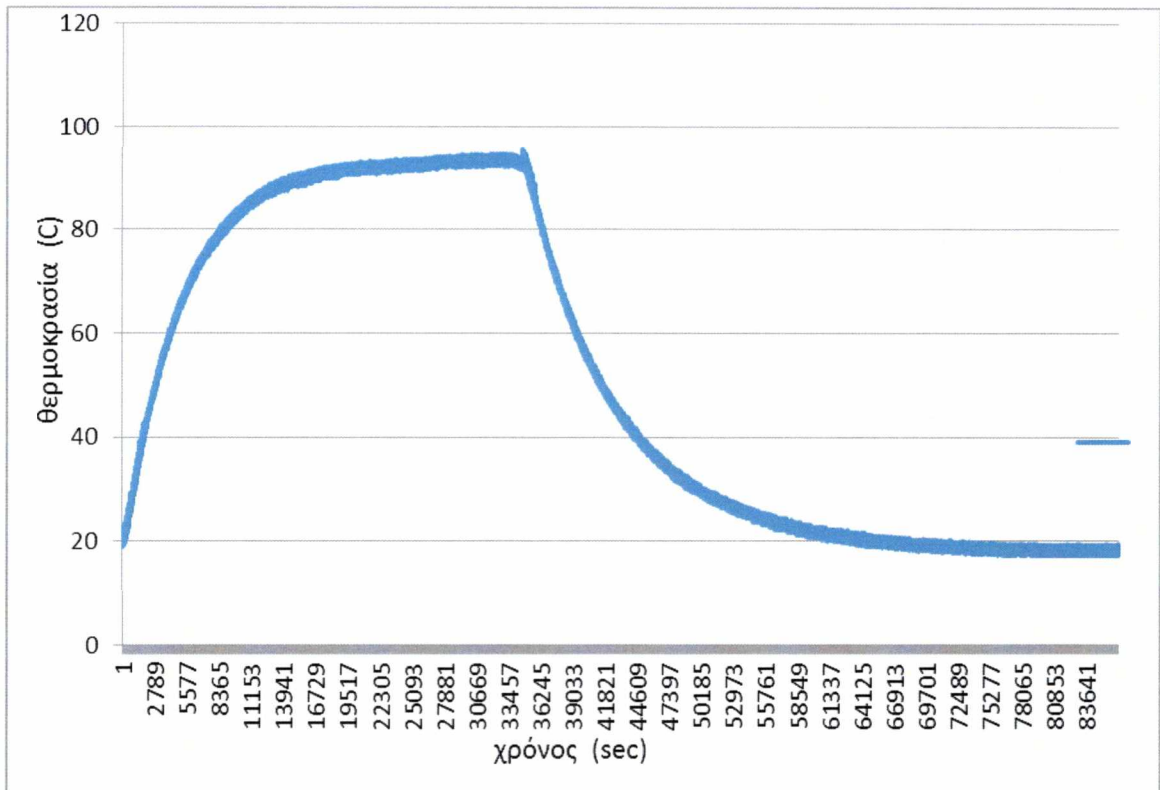
Η πρώτη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 20 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του πτερυγίου. Η θερμοκρασία του δωματίου ήταν  $20^{\circ}\text{C}$  και η μέτρηση διήρκησε συνολικά 24 ώρες. Η πειραματική διάταξη έμεινε συνδεδεμένη στο τροφοδοτικό για περίπου 10 ώρες και έπειτα αποσυνδέθηκε. Ο υπολογιστής κατέγραφε μετρήσεις της θερμοκρασίας ανά 1 δευτερόλεπτο. Η μέγιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε ήταν  $91^{\circ}\text{C}$ . Το διάγραμμα που προκύπτει από το πρόγραμμα

labview είναι το παρακάτω.



Σχήμα 5.56

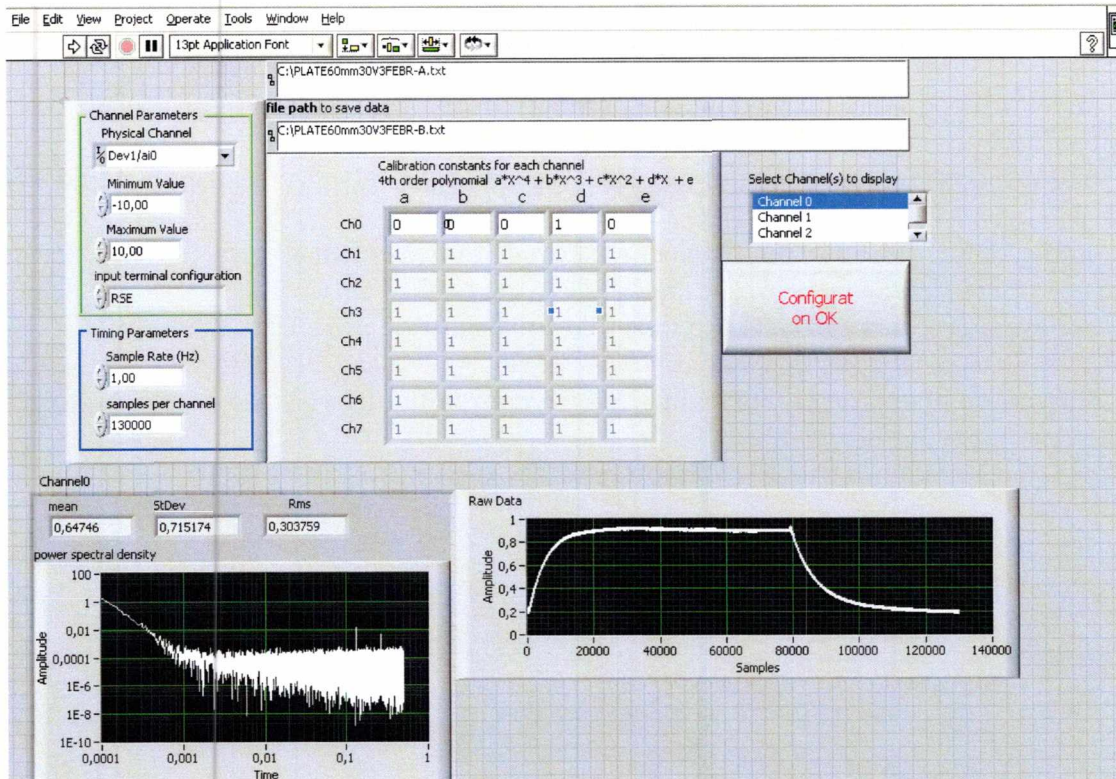
Τοποθετώντας τα δεδομένα των μετρήσεων στο πρόγραμμα excel προκύπτει και το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας, το σημείο που σταθεροποιείται η μέγιστη θερμοκρασία καθώς και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας από την στιγμή που αποσυνδέεται η παροχή ρεύματος από την πειραματική διάταξη.



Σχήμα 5.57

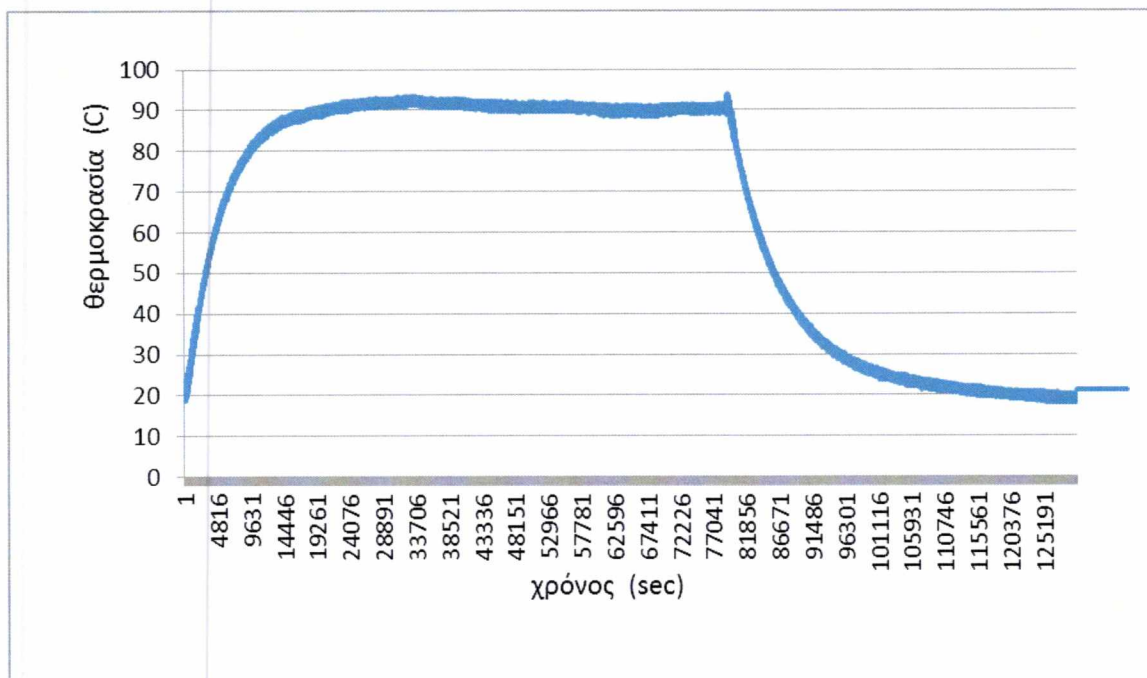
Η δεύτερη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 60 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του πτερυγίου. Εδώ η θερμοκρασία δωματίου ήταν 19° C και το η μέτρηση αυτή είχε διάρκεια 36 ωρών. Η αποσύνδεση από το ρεύμα έγινε εδώ στις 22 περίπου ώρες με την μέγιστη θερμοκρασία να έχει φτάσει στους 93° C.

Διάγραμμα από το labview για το ζεύγος θερμοστοιχείων στα 60 χιλιοστά από την κορυφή του πτερυγίου.



Σχήμα 5.58

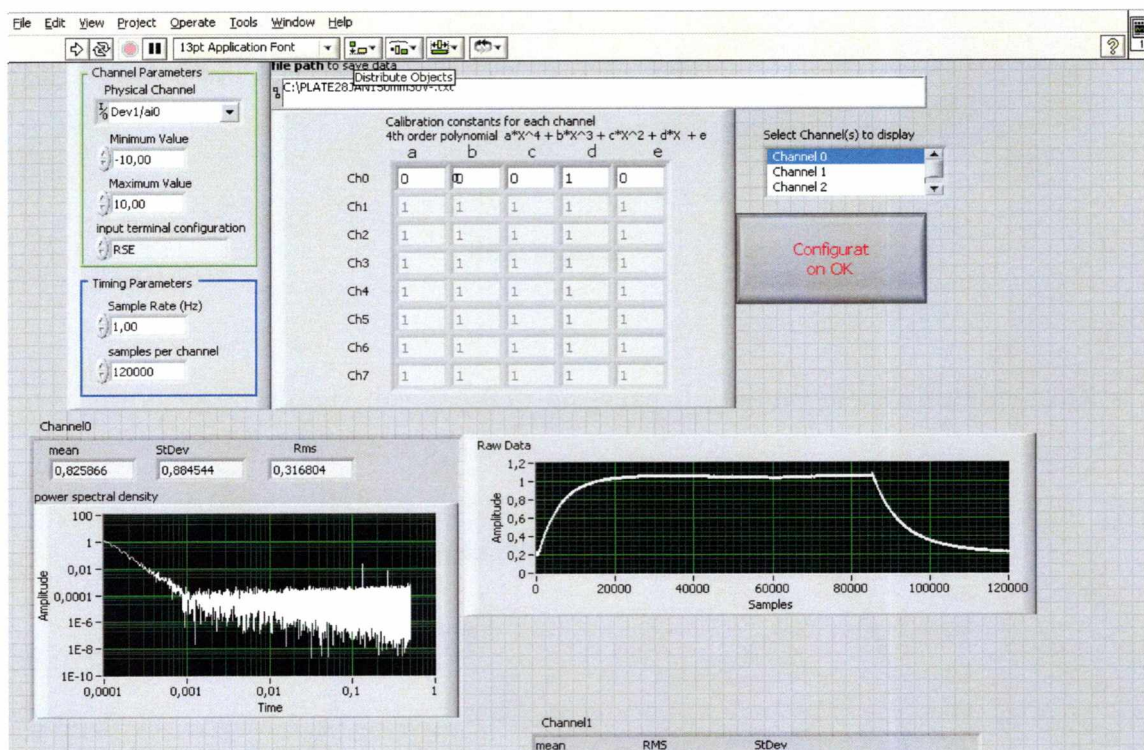
Και το αντίστοιχο διάγραμμα στο excel για τα θερμοστοιχεία στα 60 χιλιοστά.



Σχήμα 5.59

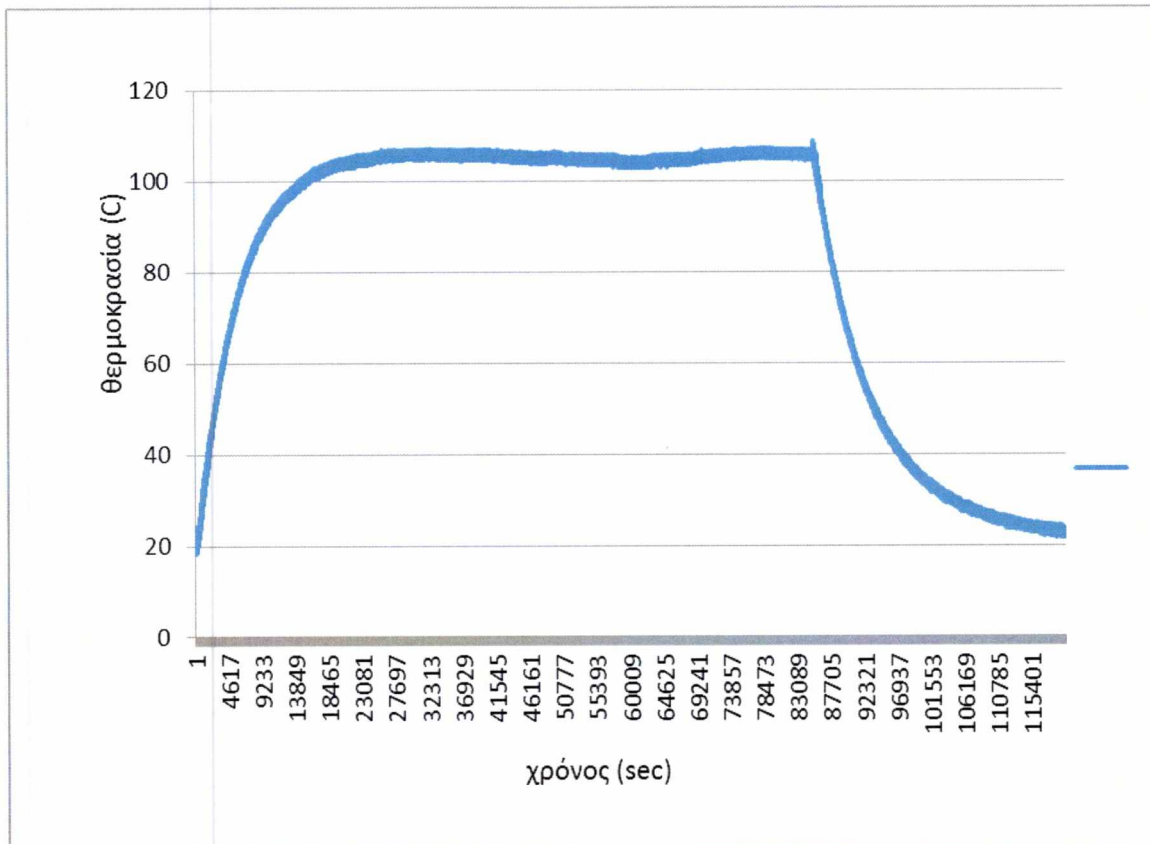
Η τρίτη μέτρηση έγινε με τα θερμοστοιχεία που απέχουν 150 χιλιοστά από την πάνω πλευρά του περυγίου. Η μέτρηση αυτή είχε διάρκεια 33 ωρών και η αποσύνδεση από το ρεύμα έγινε εδώ στις 24 ώρες. Η μέγιστη θερμοκρασία εδώ φτάνει τους 106° C. Ο ρυθμός συλλογής αποτελεσμάτων ήταν ο ίδιος με τις προηγούμενες μετρήσεις. Η θερμοκρασία του δωματίου ήταν 18° C.

Παρακάτω βρίσκεται το διάγραμμα από το πρόγραμμα labview για τα θερμοστοιχεία στα που βρίσκονται στα 150 χιλιοστά από την κορυφή του περυγίου.



Σχήμα 5.60

Και παρακάτω το αντίστοιχο διάγραμμα με τα δεδομένα από το πρόγραμμα excel.



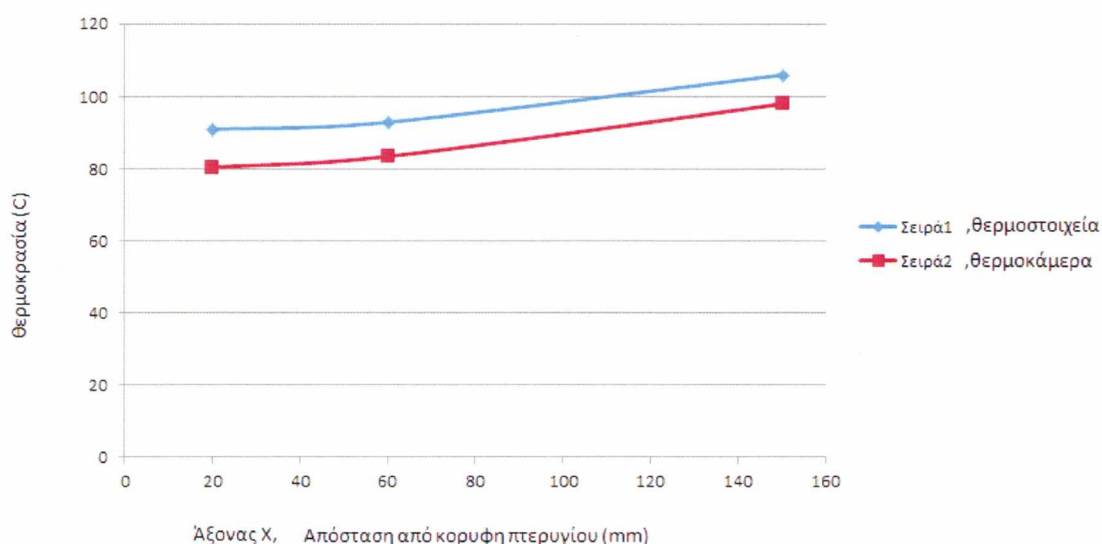
Σχήμα 5.61

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι η συμπεριφορά των θερμοκρασιών στο περύγιο είναι παραπλήσια για τις θέσεις θερμοστοιχείων των 20 και 60 χιλιοστών και πως στη θέση των 150 χιλιοστών υπάρχει μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις άλλες δύο.

Επίσης παρατηρούμε σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα πως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μικραίνει όσο πλησιάζει το περύγιο την μέγιστη θερμοκρασία του στην οποία και σταθεροποιείται. Το ίδιο συμβαίνει και στις τρεις μετρήσεις που έγιναν στις διαφορετικές θέσεις. Αντίστοιχα ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας από την στιγμή που αποσυνδέεται το τροφοδοτικό ρεύματος, μικραίνει όσο η θερμοκρασία του περυγίου πλησιάζει αυτήν του περιβάλλοντος.

### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμοκάμερας-θερμοστοιχείων

Από το πρόγραμμα της θερμικής κάμερας οι μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του περυγίου που έχουμε για τις θέσεις 20, 60 και 150 χιλιοστών είναι 80,5° C, 83,5° C και 98° C αντίστοιχα. Οι μικρότερες θερμοκρασίες που μας δείχνει η θερμική κάμερα οφείλονται στον αρκετά μικρότερο χρόνο που είχε παραμείνει η πειραματική διάταξη σε παροχή ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο που έγιναν οι μετρήσεις με τα θερμοστοιχεία. Τοποθετώντας τις θερμοκρασίες και τις αποστάσεις στο πρόγραμμα excel προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα. Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις αποστάσεις 20, 60 και 150 χιλιοστά από την κορυφή στη μέση του περυγίου και στον κατακόρυφο τις θερμοκρασίες για τα θερμοστοιχεία και για την θερμική κάμερα.



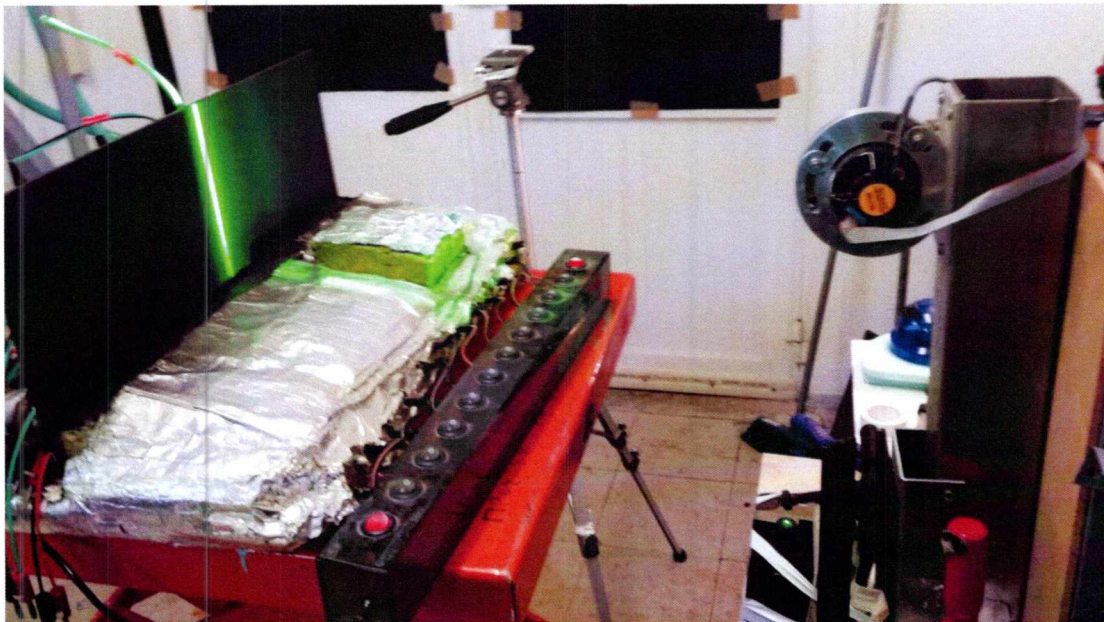
Σχήμα 5.62

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα η μπλε καμπύλη είναι αυτή με τις μετρήσεις των θερμοστοιχείων και η κόκκινη αυτή με τις μετρήσεις της θερμικής κάμερας. Βλέπουμε πως οι καμπύλες είναι σχεδόν όμοιες και έχουν σε κάθε σημείο

μια διαφορά θερμοκρασίας της τάξης των 10° C. Εάν στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε με την θερμική κάμερα ο χρόνος παραμονής της πειραματικής διάταξης σε παροχή ρεύματος ήταν μεγαλύτερος τότε οι παραπάνω καμπύλες του διαγράμματος θα συμπίπτανε.

#### **5.4 Αποτελέσματα 3ου πειράματος (καπνογόνο)**

Το τελικό πείραμα που διεξήχθη ήταν αυτό της απεικόνισης ροής καπνού παράλληλα στο πτερύγιο. Σε αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις. Η πρώτη μέτρηση έγινε με το πτερύγιο σε θερμοκρασία δωματίου, δηλαδή περίπου 20° C ενώ η δεύτερη μέτρηση έγινε με το πτερύγιο να βρίσκεται κοντά στη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτύξει, αφού αφέθηκε για πολλές ώρες σε παροχή ρεύματος 30 Volt. Οι δύο αυτές μετρήσεις καταγράφηκαν με συμβατική κάμερα υψηλής ανάλυσης και θα ακολουθήσουν στιγμιότυπα από διάφορες γωνίες λήψης ανά περίπτωση. Το καπνογόνο στις μετρήσεις τοποθετήθηκε στην βάση του πτερυγίου εκεί ακριβώς που προσκρούει η δέσμη από το λέιζερ, όπως φαίνεται παρακάτω.



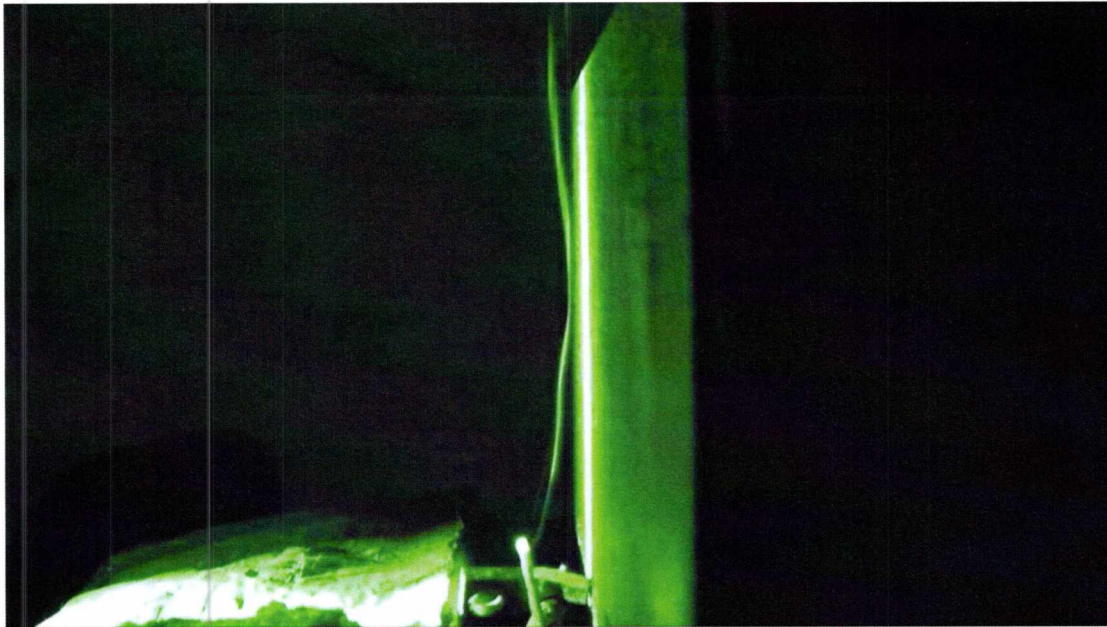
**Σχήμα 5.63**



Για την πρώτη μέτρηση παρουσιάζονται παρακάτω τρία στιγμιότυπα από τα βίντεο που ελήφθησαν, το καθένα από διαφορετική οπτική γωνία. Και τα τρία στιγμιότυπα αναπαριστούν τη ροή του καπνού παράλληλα στο πτερύγιο ενώ αυτό βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.



**Σχήμα 5.64**



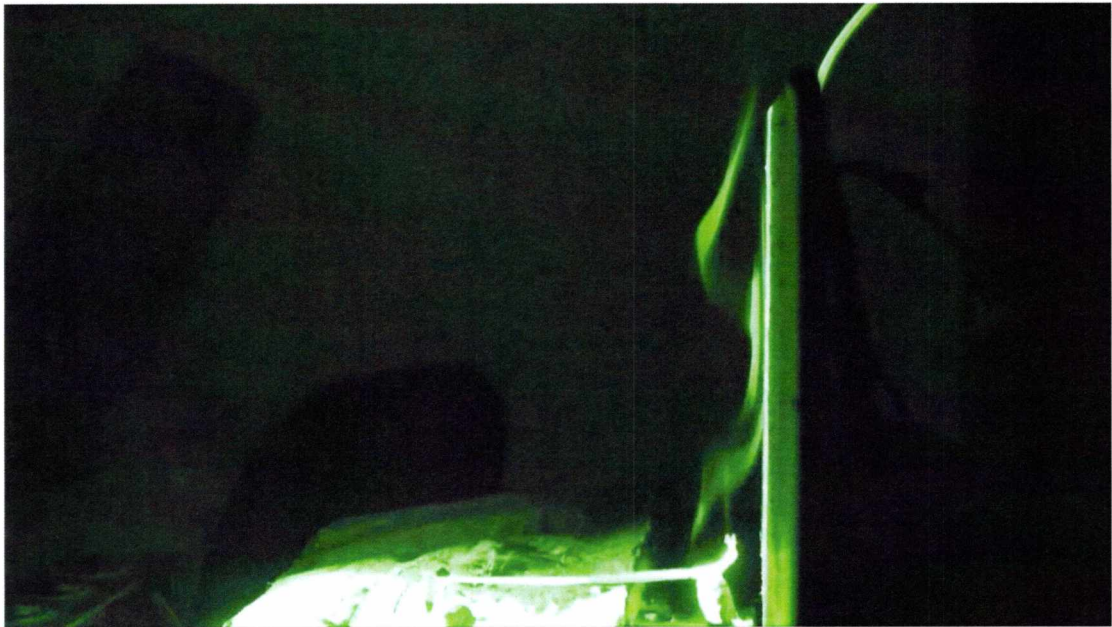
Σχήμα 5.65



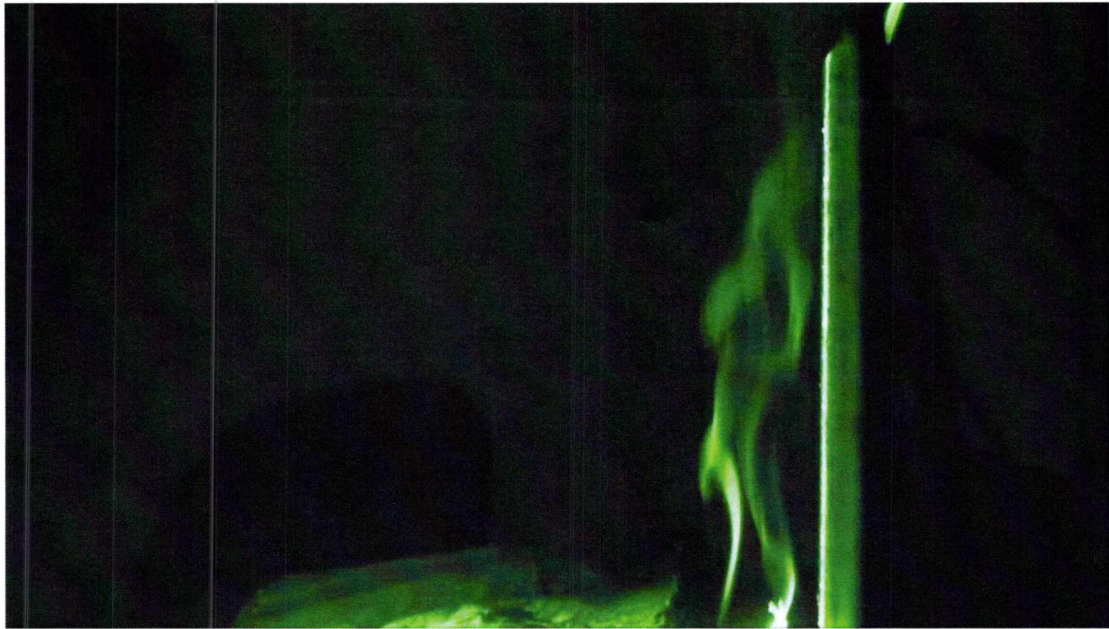
Σχήμα 5.66

Όπως παρατηρούμε από τις τρεις παραπάνω εικόνες η ροή του καρπού είναι στρωτή γεγονός το οποίο οφείλεται στην θερμοκρασία του πτερυγίου η οποία είναι ίση με αυτήν του περιβάλλοντος.

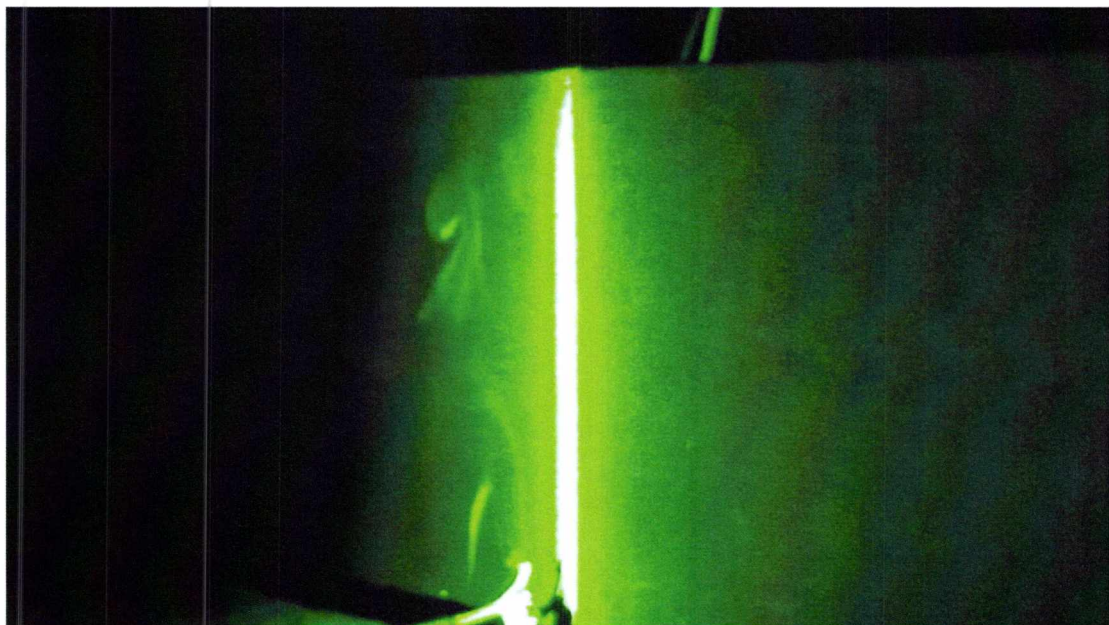
Για την δεύτερη μέτρηση παρουσιάζονται παρακάτω τέσσερα στιγμιότυπα από τα βίντεο που ελήφθησαν, το καθένα από διαφορετική οπτική γωνία. Και τα τέσσερα στιγμιότυπα αναπαριστούν τη ροή του καπνού παράλληλα στο πτερύγιο ενώ αυτό βρίσκεται σε θερμοκρασία κοντά στην οριακή που μπορεί να αναπτύξει ύστερα από παραμονή σε σύνδεση ρεύματος 30 Volt για αρκετές ώρες .



**Σχήμα 5.67**



Σχήμα 5.68



Σχήμα 5.69



**Σχήμα 5.70**

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες η ροή του καπνού είναι πλέον τυρβώδης. Αυτό οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία του πτερυγίου σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος. Η διαφορά είναι εμφανής στο πως η ροή του καπνού εξελίσσεται παράλληλα του πτερυγίου σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση.

## 5.5 Μελέτη αριθμού Nusselt στις μετρήσεις με φουσητήρα

Στα αποτελέσματα που θα παρατεθούν αναπαρίσταται γραφικά η μεταβολή του αριθμού Nusselt συναρτήσει του χρόνου για κάθε μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στο περύγιο με την χρήση φουσητήρα στο 1<sup>ο</sup> πείραμα. Ο αριθμός Nusselt είναι ίσος με την αδιαστατοποιημένη θερμοβαθμίδα στην επιφάνεια. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του είναι ο εξής:

$$Nu = \frac{Q \cdot \delta}{K \cdot |\Theta_{\text{μέσοστιφ.}} - \Theta_{\text{περιβ.}}|}$$

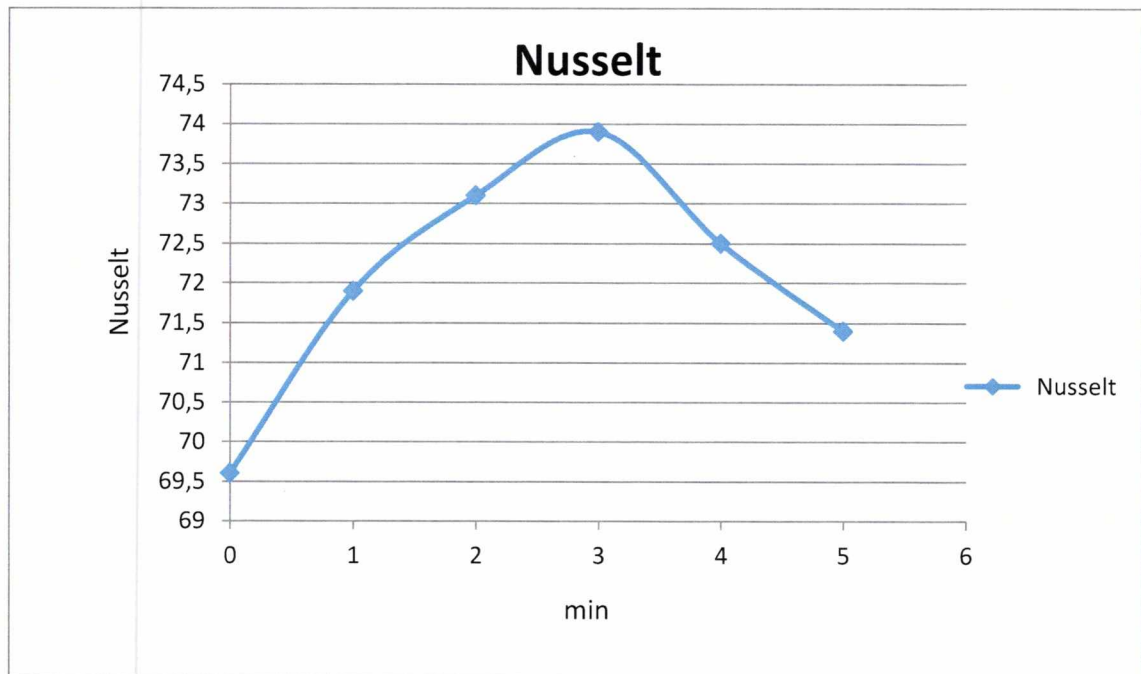
όπου  $Q$  η θερμοροή του περυγίου σε  $W/m^2$ ,  $\delta$  το εύρος του περυγίου (ύψος) σε  $m$ ,  $K$  η θερμική αγωγιμότητα του αέρα. Η μέση θερμοκρασία του περυγίου μας δίνεται από τα αντίστοιχα στιγμιότυπα μέσω του λογισμικού της Flir και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $20^\circ C$ . Έτσι προκύπτουν οι τιμές  $Q=3676W/m^2$ ,  $\delta=0,16m$ ,  $K=0.025W/mK$ . Η τιμή του  $K$  δίνεται από πίνακα με ιδιότητες του αέρα. Η τιμή του  $Q$  υπολογίζεται από την διαίρεση των Watt της διάταξης με το εμβαδό της θερμαινόμενης επιφάνειας  $A$ . Από την παροχή των 30 Volt και την συνολική αντίσταση των 3 Ohm προκύπτει πως η διάταξη έχει 300 Watt. Το εμβαδό της θερμαινόμενης επιφάνειας του περυγίου είναι  $A=0.51m \cdot 0.16m=0.0816m^2$ . Επομένως,  $Q=300W/0.081m^2=3676W/m^2$ . Οι μετρήσεις με χρήση φουσητήρα έγιναν με γωνίες πρόσκρουσης της δέσμης αέρα στις  $18^\circ$ , στις  $55^\circ$ , στις  $70^\circ$ , και στις  $90^\circ$ . Θα γίνει μελέτη του αριθμού Nusselt ανά 1 λεπτό για καθεμία περίπτωση όπως έγινε με τα στιγμιότυπα του 1<sup>ου</sup> πειράματος.

Ξεκινώντας από τον φυσητήρα με γωνία  $18^{\circ}$  έχουμε τα παρακάτω δεδομένα:

Λεπτό	Θμεση C	Nusselt
0	84,7	69,6
1	74,2	71,9
2	68,8	73,1
3	65,2	73,9
4	72,5	72,5
5	76,9	71,4

**Πίνακας 5.1**

Και παρακάτω προκύπτει το αντίστοιχο διάγραμμα στο excel:



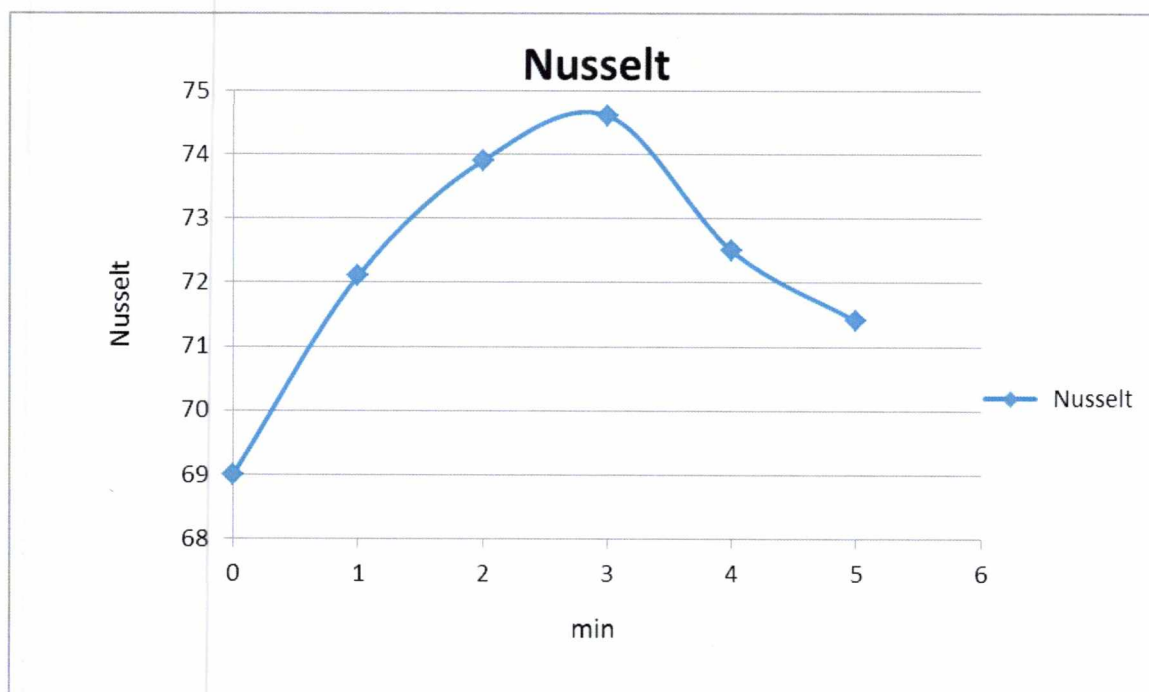
**Σχήμα 5.71**

Η επόμενη μέτρηση έγινε με γωνία  $55^\circ$ . Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

Λεπτό	Θμεση C	Nusselt
0	87,7	69
1	73,3	72,1
2	65,1	73,9
3	62,1	74,6
4	71,1	72,5
5	76,5	71,4

**Πίνακας 5.2**

Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα στο excel:



**Σχήμα 5.72**

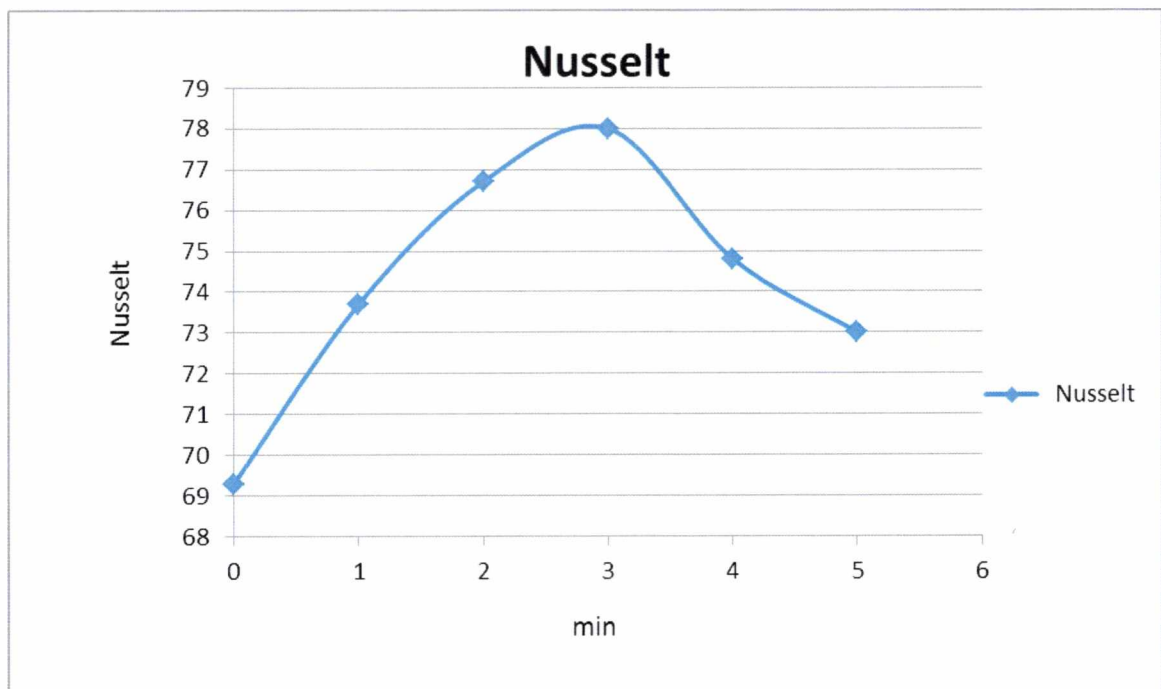


Η τρίτη μέτρηση με χρήση φουσητήρα έγινε με την γωνία στις  $70^{\circ}$ . Τα δεδομένα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:

Λεπτό	Θμεση C	Nusselt
0	86,3	69,3
1	66,2	73,7
2	53,6	76,7
3	48,5	78
4	61,4	74,8
5	69,4	73

**Πίνακας 5.3**

Παρακάτω το αντίστοιχο διάγραμμα στο excel για τις  $70^{\circ}$ .



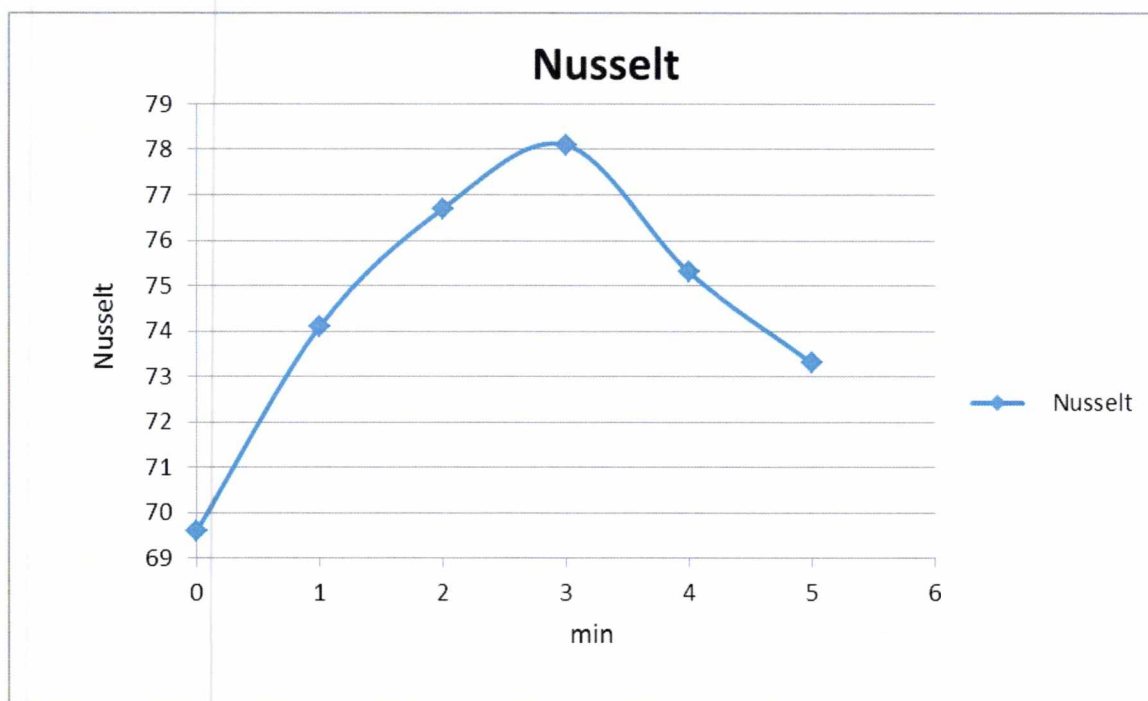
**Σχήμα 5.73**

Η τελευταία μέτρηση με χρήση φουσητήρα έγινε στις 90°. Τα δεδομένα της μέτρησης είναι τα εξής:

Λεπτό	Θμεση C	Nusselt
0	84,7	69,6
1	64,5	74,1
2	53,3	76,7
3	48,2	78,1
4	59,3	75,3
5	67,8	73,3

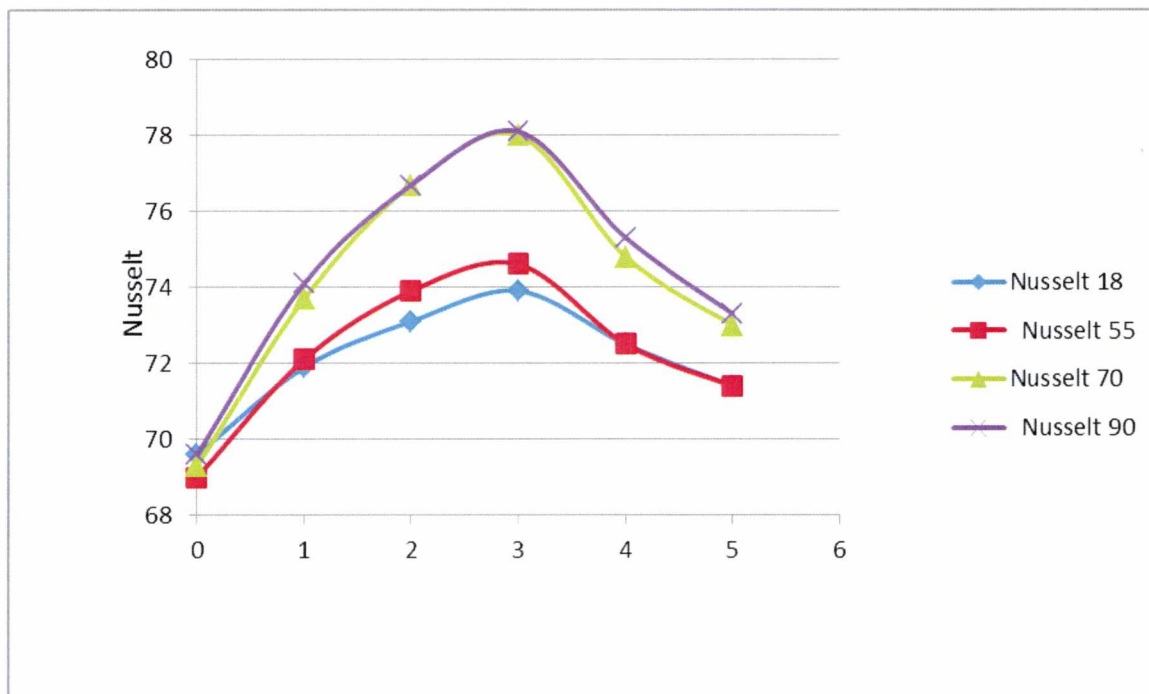
**Πίνακας 5.4**

Το διάγραμμα που προκύπτει στο excel ακολουθεί παρακάτω:



**Σχήμα 5.74**

Τέλος τοποθετώντας όλα τα δεδομένα στο πρόγραμμα excel, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα αριθμού Nusselt-Χρόνου(min), που περιλαμβάνει όλες τις μετρήσεις που έγιναν με χρήση φουσητήρα:



Σχήμα 5.75

Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα που προκύπτουν από τους αριθμούς Nusselt συναρτήσει του χρόνου στις διάφορες γωνίες τοποθέτησης του φουσητήρα, διαπιστώνουμε πως οι καμπύλες παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες μεταξύ τους. Οι καμπύλες των 18° και 55° βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, με αυτήν των 55° να μας δίνει ελαφρώς μεγαλύτερο αριθμό Nusselt με μέγιστη τιμή 74,6. Παρατηρούμε επίσης πως οι καμπύλες των 70° και 90° είναι σχεδόν πανομοιότυπες και ο μέγιστος αριθμός Nusselt εδώ έχει τιμή 78. Ακόμα διαπιστώνουμε ότι η ελάχιστη τιμή του αριθμού Nusselt σε όλες τις περιπτώσεις κυμαίνεται γύρω στο 69, γεγονός που οφείλετε στο ότι η αρχική θερμοκρασία της κάθε μέτρησης είναι σχεδόν η ίδια.

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα-Προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

- Από την αλλαγή στην γωνία πρόσκρουσης της δέσμης αέρος από τον φουσητήρα πάνω στο πτερύγιο παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις θερμοκρασίες. Οι διαφορετικές γωνίες πρόσκρουσης μεταβάλλουν τον τρόπο της εξαναγκασμένης συναγωγής, από όπου προκύπτουν και οι διαφορετικές θερμοκρασίες στο πτερύγιο. Διαπιστώθηκε μέσω του λογισμικού της θερμικής κάμερας, από την μεταβολή στη μέση θερμοκρασία της ολικής επιφάνειας του πτερυγίου ότι όταν η γωνία της δέσμης αέρος τείνει στις  $90^{\circ}$ , πετυχαίνουμε την βέλτιστη ψύξη του πτερυγίου.
- Παρατηρήθηκε στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε με τα θερμοστοιχεία και από τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν πως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας μικραίνει όσο πλησιάζει το πτερύγιο την μέγιστη θερμοκρασία του στην οποία και σταθεροποιείται. Αντίστοιχα ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας από την στιγμή που αποσυνδέεται το τροφοδοτικό ρεύματος, μικραίνει όσο η θερμοκρασία του πτερυγίου πλησιάζει αυτήν του περιβάλλοντος. Επίσης η συμπεριφορά των θερμοκρασιών στο πτερύγιο είναι παραπλήσια για τις θέσεις θερμοστοιχείων των 20 και 60 χιλιοστών ενώ στη θέση των 150 χιλιοστών υπάρχει μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις άλλες δύο.
- Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από το πείραμα με τη χρήση καπνογόνου είναι πως η ροή του καπνού μεταβάλλεται αναλόγως με την θερμοκρασία του πτερυγίου. Όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η ροή του καπνού παράλληλα σε αυτό είναι στρωτή και

εξαπλώνεται ομαλά. Αντιθέτως, με το περύγιο σε υψηλή θερμοκρασία, σχεδόν πλησιάζοντας την μέγιστη που δύναται να αναπτύξει, η ροή του καπνού παρουσίασε δύνες στον τρόπο εξαπλώσής της, μετατρέπεται δηλαδή από στρωτή σε τυρβώδης.

- Για καλύτερη απεικόνιση των θερμοκρασιών σε όλη την επιφάνεια του περυγίου χρησιμοποιώντας την θερμική κάμερα, διαπιστώθηκε πως ήταν απαραίτητος ο χρωματισμός του περυγίου με πυρίμαχη μαύρη ματ μπογιά. Διαφορετικά το άβαφο αλουμίνιο προκαλούσε αντανάκλαση και είχε ως συνέπεια την αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, υπάρχει δυνατότητα μελέτης πολλών ακόμη φαινομένων.

Για την ελεύθερη συναγωγή μπορούν να μελετηθούν οι ταχύτητες της ροής στο θερμικό οριακό στρώμα. Ακόμη, να κατασκευαστεί μία ενισχυμένη βάση στήριξης ούτως ώστε το πτερυγίο να τοποθετηθεί σε άλλες γωνίες.

Σαφέστατα όλα τα παραπάνω πειράματα μπορούν να επαναληφθούν για εξαναγκασμένη συναγωγή, σε αεροσύραγα. Στην περίπτωση αυτή οι περιπτώσεις μετρήσεων αυξάνονται καθώς υπάρχουν πολλοί περισσότεροι συνδυασμοί αλλαγής των μεταβλητών, γωνίας, φορτίου και ταχύτητας ροής.

Τέλος η προσθήκη ενός ακόμη πτερυγίου ή μιας συστοιχίας πτερυγίων αυξάνει κατά πολύ τις δυνατότητες για περαιτέρω διερεύνηση των φαινομένων που δημιουργούνται στο θερμοκρασιακό πεδίο που αναπτύσσεται γύρω από αυτά.

## Βιβλιογραφία

- W. Elenbaas. “The Heat Dissipation of Parallel Plates by Free Convection.” *Physica*. Vol. IX. No. 1, January, 1942.
- W. Elenbaas. “The Dissipation of Heat by Free Convection – The Inner Surfaces Of Vertical Tubes of Different Shapes of Cross Section.” *Physica*. IX. No. 8, September, 1942.
- S. Ostrash. “Laminar Natural Convection Flow and Heat Transfer of Fluids With and Without Heat Sources in Channels With Constant Wall Temperatures.” NACA Tech. 1952
- J. R. Bodoia and J. F. Osterle. “The Development of Free Convection Between Heated Vertical Plates.” *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C*, vol. 84. 1962.
- K. E. Starner and H. N. McManus. Jr., “An Experiment Investigation of Free Convection Heat Transfer From Rectangular Fin Arrays.” *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME. Series C*, vol. 85 1963.
- F. Harahap. “A Study on the Natural Convection Heat Transfer From Horizontal Rectangular Extended Surface.” MS thesis, Cornell University, Ithaca, New York, September, 1964.
- Welling J. R., and Wooldridge, C. B., “Free Convection Heat Transfer Coefficients From Rectangular Vertical Fins,” *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series C*, vol. 87, 1965.
- Harahap, F., and McManus, H. N., “Natural Convection Heat Transfer From Horizontal Rectangular Fin Arrays,” *Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, Series*

C, vol.89, 1967.

- Bar-Cohen, A. and Distel, H., “Thermal Characteristics of Multiple Surface Submerged Condensers,” Stanford University Press, 1978.
- Bahrami, P. A., “Natural Convection from Open- and Closed-Sided Vertical Plates and from Fin-Tube Configuration,” Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, 1979.
- Incropera, F. C., and De Witt, D. P., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” Wiley, New York, 1990.
- Holman, J. P., “Heat Transfer”, McGraw- Hill, New York, 1990.
- Raithby, G. D., and Hollands G. T., “Natural Convection Heat Transfer From Array of Isothermal Triangular Fins in Air.” Journal of Heat Transfer, Trans. ASME, February 1994.
- Πασπαλάς, Γ. Κ., “Μετάδοση Θερμότητας”, Σύλλογος Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων Β. Ελλάδος, 2001.





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125709