

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΦΛΟΓΑΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΒΑΣΕΙ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ
ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

- 1) ΜΠΙΣΔΑΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ
- 2) ΜΙΧΑΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ, 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
-----------------	----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

1.1 ΚΑΥΣΗ	6
1.2 ΦΛΟΓΕΣ (ΟΡΙΣΜΟΣ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ)	6
1.3 ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο:

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ

2.1 ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ	14
2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2.1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΥΣΤΗΡΑ	14
2.1.3 ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΕΡΑ	15
2.1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	16
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο:

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΥΣΕΩΣ

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΥΣΕΩΣ	24
-----------------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:

ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

4.1 ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ	28
4.2 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΦΛΟΓΕΣ	34
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	34
4.2.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΠΥΡΟΜΕΤΡΑ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ	35
4.2.3 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΓΥΜΝΑ ΣΥΡΜΑΤΙΝΑ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ (BARE WIRE THERMOCOUPLE)	36
4.2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	37
4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο:

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	46
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	48
5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	69
5.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕΣΩ SOFTWARE	82
5.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πτυχιακή αυτή εργασία έχει σκοπό τη μελέτη τυρβώδους φλόγας διάχυσης βάση πειραματικών μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έγιναν μετρήσεις θερμοκρασιών, είτε με απευθείας ανάγνωση των ενδείξεων των πυρομέτρων, είτε με τη βοήθεια ενός σχεδιασμένου λογισμικού software.

Η πτυχιακή εργασία περιέχει συνολικά πέντε κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων εξηγείται συνοπτικά στη συνέχεια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται στοιχεία σχετικά με την καύση και τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους φλόγας διάχυσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής διατάξεως, αναφέρονται δηλαδή τα λειτουργικά στοιχεία του καυστήρα που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων, καθώς και το κύκλωμα παροχής καυσίμου και τροφοδοσίας αέρα. Επίσης υπάρχει περιγραφή της πολιτικής εγκατάστασης διόγκωσης περλίτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος καυστήρας. Στο τρίτο κεφάλαιο περιέχεται η στοιχειομετρία της καύσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο υπάρχει περιγραφή των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και μια παρουσίαση των σφαλμάτων κατά τις μετρήσεις θερμοκρασιών με θερμοστοιχεία – πυρόμετρα. Επίσης υπάρχουν στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία μέτρησης θερμοκρασιών μέσω λογισμικού. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιέχεται το πειραματικό μέρος δηλαδή τα αποτελέσματα των μετρήσεων μαζί με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, συμπεράσματα και στο τέλος ακολουθεί η βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ
ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

1.1 ΚΑΥΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δοθούν μερικά στοιχεία σχετικά με την καύση και ειδικότερα με τη φλόγα, τις ιδιότητές της, το διαχωρισμό της σε διάφορες κατηγορίες και θα αναλυθεί η τυρβώδης φλόγα διάχυσης επειδή τέτοιας μορφής είναι η φλόγα που μελετούμε στα πειράματα.

Καύση είναι κάθε εξώθερμη αντίδραση ενός υλικού με το οξυγόνο που παρουσιάζει τέτοιο βαθμό απόδοσης θερμότητας, ώστε να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη. Ο παραπάνω ορισμός έχει δοθεί εξετάζοντας την καύση από τεχνική σκοπιά ενώ θα μπορούσαμε να δώσουμε και τον ορισμό ότι η καύση είναι η χημική αντίδραση μιας ουσίας ανόργανης ή οργανικής με το οξυγόνο με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και φωτεινής λάμψης.

Η καύση μπορεί να διαχωριστεί σε τέλεια και ατελή. Στην τέλεια καύση τα προϊόντα της αντίδρασης δεν επιδέχονται περαιτέρω μεταβολή αν βρεθούν σε συνθήκες κατάλληλες για καύση π.χ CO_2 , ενώ στην ατελή υπάρχουν προϊόντα τα οποία μπορούν να αντιδράσουν εκ νέου με το οξυγόνο π.χ CO .

Ως γνωστό η καύση παίζει μεγάλο ρόλο στην οικονομία και την σύγχρονη τεχνολογία, διότι μέσω αυτής εκμεταλλευόμαστε μεγάλα ποσά ενέργειας για ανάγκες της καθημερινής ζωής.

1.2 ΦΛΟΓΕΣ (ΟΡΙΣΜΟΣ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ)

Φλόγα είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στα οποία λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο ενεργειακό μέρος της χημικής μετατροπής του καυσίμου σε θερμική ενέργεια .

Οι φλόγες διακρίνονται σε στρωτές ή τυρβώδεις, σε φυσικοελεγχόμενες ή κινητο-επηρεαζόμενες, σε διάχυσης ή προαναμιγμένες, σε ομογενείς ή ετερογενείς και σε συνεχείς ή διακοπτόμενες. Ο διαχωρισμός σε στρωτή

και τυρβώδη μορφή σχετίζεται με τον τύπο της ροής του καυσίμου και του οξειδωτικού. Αν ο αριθμός Reynolds, $Re=U \cdot d/v$, είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της τιμής 10^3 προκύπτει ο διαχωρισμός σε φλόγες στρωτές ή τυρβώδεις αντίστοιχα. Για ροή σε μακρύ σωλήνα οι τιμές Re για στρωτή ροή είναι μικρότερες του 2300, ενώ για τυρβώδη ροή μεγαλύτερες του 3200.

Η στρωτή φλόγα έχει καθορισμένο περίγραμμα περιορισμένο στο χώρο όταν την εξετάζουμε μακροσκοπικά, ενώ η τυρβώδης αποτελείται από τυρβώδεις μάζες διάπυρης ύλης που μεταφέρονται συνεχώς. Η μία μορφή από την άλλη διαφέρουν ως προς στην ποιότητα της φλόγας. Οι τυρβώδεις φλόγες έχουν πιο παχύ μέτωπο διάδοσης ενώ οι στρωτές περίπου κωνικό και οι πρώτες συνοδεύονται από αρκετό θόρυβο. Οι στρωτές φλόγες δε βρίσκουν πολλές εφαρμογές και μελετώνται κυρίως εργαστηριακά. Αντίθετα οι τυρβώδεις φλόγες παρατηρούνται πολύ συχνά στην πράξη και όσον αφορά τη μελέτη τους παρουσιάζουν δυσκολίες λόγω της μορφής τους και της πολυπλοκότητάς τους.

Ο δεύτερος διαχωρισμός έχει σχέση με την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων που ανάλογα με το μέγεθός της μπορεί να υπάρχει εξάρτηση από τη χημική κινητική του συστήματος. Στις φυσικοελεγχόμενες φλόγες δεν απαιτείται γνώση της χημικής κινητικής και πρωτεύοντα ρόλο παίζει η διάχυση, ενώ στις επηρεαζόμενες από την κινητική των αντιδράσεων δεν υπάρχει απόλυτη συσχέτιση (έλεγχος) με φυσικές διεργασίες. Παραδείγματα της πρώτης κατηγορίας είναι καύση σε δεξαμενή καυσίμου, φωτιά σε δάσος κ.λ.π, ενώ της δεύτερης η καύση σε στροβιλομηχανές.

Η διάκριση σε προαναμιγμένες και διάχυσης έχει σχέση με την ύπαρξη ή όχι προανάμιξης καυσίμου και οξειδωτικού. Προανάμιξη γίνεται για παράδειγμα στις μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ διάχυση έχουμε στην καύση αερίου αποθηκευμένου σε φιάλη.

Οι ομογενείς αντιδράσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο σε εργαστηριακό χώρο καθώς σε αυτές δεν αλλάζουν οι συγκεντρώσεις και οι φυσικές ιδιότητες σε συνάρτηση με το χώρο ή το χρόνο του αερίου που αντιδρά. Στην πράξη οι παραπάνω ιδιότητες μεταβάλλονται στο χώρο λόγω κίνησης του αερίου και της μεταφοράς θερμότητας.

Τέλος οι φλόγες διακρίνονται σε συνεχείς ή διακοπτόμενες. Στην πρώτη κατηγορία υπάρχει συνεχής τροφοδοσία καυσίμου και οξειδωτικού καθώς και συνεχής απομάκρυνση των προϊόντων. Συνεχείς είναι οι φλόγες σε εστίες και σε αεριοστροβίλους, ενώ διακοπτόμενη κάυση έχουμε σε μηχανή εσωτερικής καύσης όπου υπάρχει κύκλος λειτουργίας. Στη συνέχεια ακολουθούν ορισμένα στοιχεία για τις φλόγες διάχυσης καθότι στα πειράματα έγινε μελέτη των θερμοκρασιακών κατανομών σε φλόγα αυτής της περίπτωσης.

1.3 ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ

Η μελέτη των τυρβωδών φλογών διάχυσης βασίζεται στην ανάλυση των φλογών ελεύθερης δέσμης. Η ελεύθερη δέσμη είναι σχετικά απλή όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της και γι' αυτό έχει γίνει αντικείμενο πολλών θεωρητικών και πειραματικών ερευνών.

Οι ελεύθερες δέσμες τυρβωδών φλογών διάχυσης έχουν ένα θαμνώδες μέτωπο όμοιο με αυτό των προανεμιγμένων. Όσον αφορά τη φωτεινότητα οι φλόγες διάχυσης υδρογοναθράκων είναι γενικά πιο φωτεινές από τις αντίστοιχες προανεμιγμένες γιατί κάποιο ποσοστό αιθάλης παρουσιάζεται στο εσωτερικό της φλόγας. Το χρώμα της φλόγας είναι μπλε στη βάση της λόγω της εκεί απουσίας αιθάλης και η φωτεινότητά της είναι αρκετά μικρή. Όσο απομακρυνόμαστε από τη βάση της, τα ποσοστά αιθάλης αυξάνονται και η φλόγα παίρνει ένα έντονο κίτρινο χρώμα. Όταν το ποσοστό αιθάλης στο καύσιμο είναι μικρό, όπως στο μεθάνιο, το μήκος

της μπλε περιοχής της φλόγας είναι μεγαλύτερο και η φωτεινότητα της κίτρινης περιοχής είναι μικρότερη.

Η μορφή και η ποιότητα της φλόγας αλλάζει σημαντικά κατά τη μετάβαση της ροής από στρωτή σε τυρβώδη. Όσο η φλόγα είναι στρωτή το μήκος της αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας έγχυσης του αερίου καυσίμου στον καυστήρα μέχρι μία μέγιστη τιμή. Με την αύξηση της ταχύτητας, η τύρβη αρχίζει να επηρεάζει το ύψος της φλόγας και δημιουργείται μια μεταβατική περιοχή, στην οποία η συνεχώς αυξανόμενη ένταση της τύρβης λόγω της αυξανόμενης ταχύτητας έχει σαν αποτελέσματα οι φλόγες να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στρωτές. Ο μεταβατικός αριθμός Re είναι διαφορετικός για διαφορετικά καύσιμα. Αν η ταχύτητα εγχύσεως του καυσίμου αυξηθεί κι άλλο έχουμε τις πλήρως ανεπτυγμένες τυρβώδεις φλόγες διάχυσης όπου τα μήκη των φλογών είτε παραμένουν σταθερά, είτε αυξάνουν με συνεχώς μικρότερο ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο ότι η εισαγωγή του αέρα και ο ρυθμός αναμίξεώς του με το καύσιμο έχουν σχέση αναλογίας με τη ροή του καυσίμου. Επίσης υπάρχει μια σημαντική εξάρτηση του μήκους της φλόγας από την αρχική διάμετρο του καυστήρα όπου όσο αυτή αυξάνεται η φλόγα επιμηκύνεται.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι η σταθερότητα της φλόγας. Όταν η ταχύτητα είναι χαμηλή η βάση της ελεύθερης δέσμης βρίσκεται πολύ κοντά στην έξοδο του σωλήνα του καυστήρα και η φλόγα ονομάζεται προσκολλημένη. Με την αύξηση της ταχύτητας εγχύσεως του καυσίμου, σχηματίζονται κενά χαμηλής φωτεινότητας στη βάση της φλόγας ο αριθμός των οποίων αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας μέχρι το σημείο, όπου διακόπτεται η συνέχεια της φλόγας κοντά στο στόμιο του καυστήρα (lift-off). Μεγαλύτερη αύξηση της ταχύτητας οδηγεί στην αύξηση της απόστασης της βάσης της φλόγας από το στόμιο του καυστήρα. Τέλος με υπερβολική αύξηση της ταχύτητας μεταπίπτουμε στο φαινόμενο σβέσης της φλόγας.

Η σταθερότητα της φλόγας επηρεάζει πολλές πρακτικές εφαρμογές καύσης. Για παράδειγμα το φαινόμενο ανασήκωσης της φλόγας (lift-off) πρέπει να αποφεύγεται, έτσι ώστε η φλόγα να είναι κοντά στο καυστήρα και η θέση της να είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του καυσίμου. Αυτό επιτρέπει την εύκολη εκκίνηση με σπινθηριστή ή με φλόγα πιλότο στον καυστήρα και εξασφαλίζει τον έλεγχο της θέσης της φλόγας. Για λόγους ασφαλείας η λειτουργία κοντά στα όρια σβέσης πρέπει επίσης να αποφεύγεται καθώς ο κίνδυνος έκρηξης, όπως στην περίπτωση ενός μεγάλου φούρνου γεμάτου με άκαυστο μίγμα καυσίμου – αέρα, είναι πολύ μεγάλος.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στις τυρβώδεις φλόγες διάχυσης υπάρχει αρκετός θόρυθος. Μία στρωτή φλόγα διάχυσης είναι πρακτικά αθόρυθη σε αντίθεση με την τυρβώδη, όπου ταυτόχρονα με την έναρξη της τύρβης και λόγω των διακυμάνσεων της πίεσης, δημιουργείται θόρυβος.

Οι τυρβώδεις φλόγες διάχυσης εκπέμπουν σημαντικά ποσά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Μερικές φορές η ακτινοβολία είναι επιθυμητή, καθώς συνεισφέρει στη θέρμανση ενός φορτίου. Αντίθετα, υπάρχουν εφαρμογές όπου οι απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση της απόδοσης, όπως στις μηχανές Diesel.

Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από το ποσοστό άνθρακα που υπάρχει στο καύσιμο. Υπάρχουν δύο πηγές ακτινοβολίας στις φλόγες, η μοριακή ακτινοβολία κυρίως από CO_2 και H_2O και η ακτινοβολία μέλανος σώματος από την αιθάλη της φλόγας. Από πειραματικές μετρήσεις σε φλόγες μεθανίου – αέρα βρέθηκε ότι η συνεισφορά της ακτινοβολίας θερμότητας της αιθάλης είναι ασήμαντη σε σχέση με την ολική. Με την αύξηση του ποσοστού άνθρακα του καυσίμου η ακτινοβολία μέλανος σώματος από την αιθάλη συνεισφέρει σημαντικά στην ολική ακτινοβολία.

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται φλόγες διάχυσης ο αέρας καύσης εισάγεται σε συνδυασμό με τη ροή του καυσίμου, σε αντίθεση με τις ελεύθερες δέσμες φλογών όπου η δέσμη του καυσίμου εισάγεται σε ακίνητο αέρα. Για παράδειγμα σε όλες τις βιομηχανικές εστίες το καύσιμο εγχύεται από ακροφύσιο που συνήθως είναι τοποθετημένο στην είσοδο της εστίας. Η προκύπτουσα καύσιμη δέσμη, που στην πραγματικότητα είναι μία περιορισμένη δέσμη σε ένα κλειστό θάλαμο, έχει την ιδιότητα (όπως και η ελεύθερη δέσμη) της αναρρόφησης του αέρα του θαλάμου μέσα στον οποίο εγχύεται. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

(α) ο αέρας βρίσκεται σε περίσσεια και η δέσμη εισέρχεται στο θάλαμο ελεύθερα, απλώνεται μέσα σε αυτόν και φτάνει στα τοιχώματά του,

(β) ο αέρας είναι λιγότερος από αυτόν που μπορεί να αναρροφηθεί από τη δέσμη. Τότε αναπτύσσεται το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας τη στιγμή που η αναρρόφηση όλης της ποσότητας του υπάρχοντος αέρα έχει τελειώσει. Τα καυσαέρια επιστρέφουν στον καυστήρα και αναρροφώνται από την κύρια δέσμη.

Οι σημαντικότερες συνέπειες της ανακυκλοφορίας και της αναρρόφησης θερμών καυσαερίων στη ροή της καύσιμης δέσμης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο του καυσίμου μίγματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον καλύτερο έλεγχο του ρυθμού της καύσης εξασφαλίζοντας έτσι τη σταθεροποίηση της φλόγας. Η μείωση της ποσότητας του οξυγόνου οδηγεί στη μείωση του ρυθμού καύσης και έτσι η φλόγα επιμηκύνεται, κάτι που συνεπάγεται την ανεπιθύμητη επιμήκυνση του θαλάμου καύσης. Η επέκταση του μήκους του θαλάμου απαιτείται μόνο για την ολοκλήρωση του φαινομένου της καύσης αφού το μέγιστο ποσό θερμότητας απελευθερώνεται στην αρχή του θαλάμου καύσης όπως ακριβώς συμβαίνει στις ελεύθερες δέσμες. Η

αραιώση του καυσίμου μίγματος συνεπάγεται ακόμη τη μείωση της ταχύτητας καύσης σε σχέση με την αντίστοιχη της ελεύθερης δέσμης.

Ένα σημαντικό φαινόμενο στις φλόγες διάχυσης είναι η συστροφή (swirl). Μέσω της συστροφής ο κατασκευαστής μπορεί να αλλάξει το μήκος και τη μορφή της φλόγας και έτσι να ελέγξει τη μεταφορά θερμότητας από τη φλόγα προς τις επιφάνειες του θαλάμου καύσης. Η συστροφή εισάγεται στους καυστήρες μέσω εφαπτομενικών ακροφυσίων εισόδου ή μέσω οδηγητικών πτερυγίων που οδηγούν τη ροή εφαπτομενικά στη φλόγα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της συστροφής είναι ότι μπορεί να σταθεροποιήσει τη φλόγα, δημιουργώντας ζώνη ανακυκλοφορίας λόγω των κλίσεων της πίεσης, και να ελέγξει το μήκος της φλόγας. Το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτούνται μεγάλες πτώσεις πίεσεως, γι' αυτό είναι απαραίτητο κατά τον σχεδιασμό των καυστήρων να επιλέγεται ο ελάχιστος βαθμός συστροφής που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η καύση ενός συγκεκριμένου καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΣ

2.1 ΚΑΥΣΤΗΡΑΣ

2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται κυρίως στον καυστήρα ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Ο καυστήρας αυτός είναι ικανός για παραγωγή θερμικής ισχύος 40 KW ή 36 Kcal/hr. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι προπάνιο αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα καύσιμα όπως βουτάνιο ή LPG. Ο καυστήρας είχε χρησιμοποιηθεί για να ερευνηθεί η ανάφλεξη και τα λειτουργικά στοιχεία κάθετου (όρθιου) βιομηχανικού φούρνου διόγκωσης περλίτη και για την ανάπτυξη υπολογιστικού βοηθήματος για αριθμητική προσομείωση της διεργασίας της καύσης σε κάθετη αξονοσυμμετρική εστία. Σχετικά με τη διαδικασία διόγκωσης περλίτη η οποία εφαρμόστηκε στο εργαστήριο ακολουθούν μερικά στοιχεία μετά την περιγραφή του καυστήρα και των κυκλωμάτων τροφοδοσίας αέρα – παροχής καυσίμου.

2.1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

Ο καυστήρας ο οποίος φαίνεται σχεδιασμένος είναι αξονοσυμμετρικός και το καύσιμο προσάγεται μέσω ενός κεντρικού αγωγού στον άξονα συμμετρίας του. Ο αέρας καύσης προσάγεται εφαπτομενικά μέσω δύο αγωγών μικρής διαμέτρου τοποθετημένων αντιδιαμετρικά και σε ίσες αποστάσεις στο κέλυφος του καυστήρα ώστε να δημιουργείται συστροφή. Έτσι γίνεται η ανάμειξη με το καύσιμο και επιτυγχάνεται η καύση με τα απαιτούμενα δυναμικά χαρακτηριστικά, πεδίο ταχυτήτων και πεδίο θερμοκρασιών. Ο αγωγός του προπανίου είναι ταπωμένος στην έξοδό του και το καύσιμο εγχύεται στον καυστήρα από έξι οπές (συμμετρικές ανά δύο) που έχουν δημιουργηθεί περιφερειακά λίγο πριν την έξοδο για να γίνει καλύτερη ανάμειξη αέρα – καυσίμου.

Η απελευθέρωση της θερμικής ισχύος γίνεται διαμέσου ενός μικρού στομίου διαμέτρου εικοσιεπτά χιλιοστών. Είναι δυνατή η ύπαρξη προθέρμανσης αέρα με τη βοήθεια ηλεκτρικής αντιστάσεως μέχρι τους 150⁰C. Στο σχέδιο του καυστήρα που ακολουθεί φαίνεται ότι ο αέρας βρίσκεται κατά μήκος του οριζοντίου τμήματος Α και μετά διαμέσου των δύο σωλήνων Β στο θάλαμο C. Η διάμετρος του θαλάμου μειώνεται προοδευτικά για να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή στην ταχύτητα του αερίου. Ο καυστήρας είναι σχεδιασμένος για λειτουργία σε όρθια θέση μολονότι δεν υπάρχει λόγος να αποτραπεί η οριζόντια λειτουργία.

2.1.3 ΠΑΡΟΧΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΑΕΡΑ

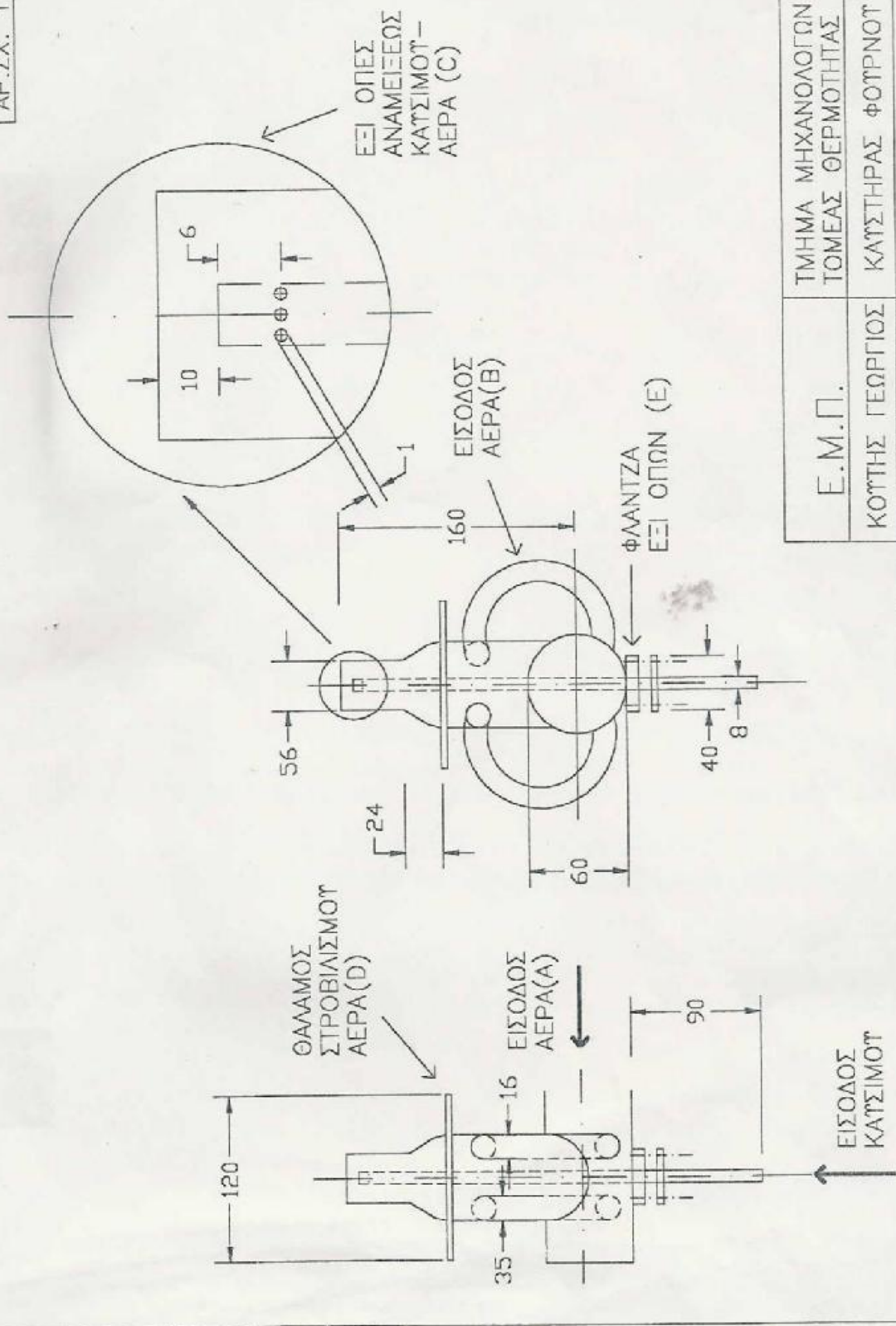
Όπως έχει αναφερθεί το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε είναι προπάνιο, η προμήθευση του οποίου έγινε από το εμπόριο σε φιάλες. Ταυτόχρονα με την κύρια φιάλη λόγω του κινδύνου παγώματός της, υπάρχει και μία εφεδρική η οποία σε τέτοια περίπτωση εξασφαλίζει τη σταθερή παροχή καυσίμου. Στην κύρια φιάλη υπάρχει βάνα για τη ρύθμιση της παροχής καυσίμου και ακολουθεί μανόμετρο για τη ρύθμιση της πίεσης του προπανίου, το οποίο αρχικά βρίσκεται πεπιεσμένο. Μετά υπάρχει ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα συνδεδεμένη με το ηλεκτρονικό σύστημα ασφαλείας και στη συνέχεια ροόμετρο πλωτήρος που ρυθμίζει την παροχή καυσίμου. Τέλος υπάρχει βαλβίδα αντεπιστροφής για την αποφυγή αναρροφήσεως της φλόγας από τη φιάλη.

Το κύκλωμα τροφοδοσίας αέρα αποτελείται από ανεμιστήρα, συγκλίνον ακροφύσιο, βάνα και κύκλωμα προθέρμανσης αέρα. Ο ανεμιστήρας είναι τύπου C2/360 και δίνει παροχή αέρα 10 – 45 m³/h ολικής πίεσεως 750 mm H₂O, λειτουργεί σε 2900 rpm και έχει ισχύ 5 HP. Το συγκλίνον ακροφύσιο που ακολουθεί αυξάνει την ταχύτητα του αέρα και στη συνέχεια μέσω βάνας τύπου BUTTERFLY μειώνεται η πίεση και ρυθμίζεται η παροχή

του. Ο αέρας στη συνέχεια προθερμαίνεται μέσω εννιά θερμικών αντιστάσεων ισχύος 1 KW (σύνολο 9 KW) που περιέχονται σε ένα κουτί διαστάσεων (30X25X35) cm³ το οποίο έχει μόνωση αμιάντου. Μετά την προθέρμανση υπάρχει μανόμετρο το οποίο υπολογίζει την πτώση πίεσεως του αέρα στον αγωγό εισαγωγής σε mm στήλης ύδατος. Ο αέρας τροφοδοτείται στον καυστήρα μέσω ενός εύκαμπτου σπιράλ.

2.1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σχέδιο του καυστήρα που περιγράφηκε πιο πάνω έχει αποδειχθεί πολύ πετυχημένο για χρήση σε εγκατάσταση διόγκωσης περλίτη όπου χρησιμοποιήθηκε ο συγκεκριμένος καυστήρας, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πολλές άλλες περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρότυπος καυστήρας. Η ικανότητα ελέγχου του βασικού αέρα ανεξάρτητα από τον δευτερεύοντα επιτρέπει τη λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα ισχύος, γεγονός το οποίο είναι σημαντικό σε μια πειραματική εργασία. Το σχέδιο αυτό του καυστήρα είναι χρήσιμο και για εφαρμογές με παρεμφερείς περιορισμούς και χαρακτηριστικά. Οι θερμοκρασίες κοντά στους 1400⁰C στη φλόγα μπορούν να επιτευχθούν εύκολα με χρησιμοποίηση στοιχειομετρικού μίγματος καύσης καυσίμου – πρωτεύοντος αέρα, μολονότι για διεξαγωγή πειραμάτων με ορυκτά αυτή η θερμοκρασία επιτυγχάνεται με κατάλληλο έλεγχο της αναλογίας καυσίμου και λόγου του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον αέρα. Τέλος είναι εύκολο να λειτουργήσει στα ίδια επίπεδα ισχύος με οποιοδήποτε αέριο καύσιμο.



Ε.Μ.Π.	ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΚΟΤΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	ΚΑΤΣΙΤΗΡΑΣ ΦΟΤΗΡΩΤ

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ

Ο περλίτης είναι ένα ηφαιστειογενές υαλώδες πέτρωμα που όταν θερμανθεί διογκώνεται και παράγεται έτσι ένα πορώδες υλικό. Η ονομασία του προκύπτει από το μαργαρίτη (pearl) με τον οποίο έχει ίδια λάμψη. Ο περλίτης περιέχει 2 – 6 % κρυσταλλικό νερό και με τη θέρμανση πραγματοποιείται αλλαγή φάσης που οδηγεί σε διόγκωση (ο όγκος του αυξάνεται από 10 έως 20 φορές).

Ο περλίτης έχει συναντηθεί με ποικίλα χρώματα όπως λευκό, γκρι, μαύρο, κίτρινο – καφέ, πράσινο – κίτρινο, που εξαρτώνται από το υπέδαφος, τις καιρικές συνθήκες κ.λ.π. Μπορεί να έχει πολλές μορφές όπως ανοιχτόχρωμοι κόκκοι, ενιαία μάζα, υαλώδη όψη. Δεν έχει σταθερή χημική σύσταση περιέχει όμως SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , N_2O , νερό 2 – 6 % κ.α. Η ποικιλομορφία του έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη αρκετών εργαστηριακών μετρήσεων και μεθόδων διόγκωσης, ενώ δεν υπάρχει τυποποίηση σχετικά με τη διόγκωση. Βρίσκεται σε υψηλά στρώματα στο υπέδαφος και έτσι η διαδικασία εξόρυξής του είναι σχετικά εύκολη.

Έχει πάρα πολλές εφαρμογές κυρίως σε διογκωμένη μορφή. Ο διαμορφωμένος περλίτης περιέχεται στο μπετόν, στο γύψο, στο τσιμέντο, σε μονωτικές πλάκες, σε κελιά, σε επικαλύμματα αγωγών. Τεράστια είναι η εφαρμογή του στην κατασκευή φίλτρων. Χρησιμοποιείται σαν μέσο απομάκρυνσης και καθαρισμού πετρελαίου, στη βιομηχανία τροφίμων για το φιλτράρισμα φυτικών και ζωϊκών ελαίων, ξυδιού, κρασιού, ζάχαρης, καθώς και στη βιομηχανία φαρμάκων για το φιλτράρισμα αντιβιοτικών. Χρησιμοποιείται στη γεωργία επειδή εξασφαλίζει την υγρασία και τον αέρα.

Ο περλίτης χρησιμοποιείται σε υδροφοβισμένη μορφή, η οποία έχει σαν επιπλέον διαμόρφωση εκτός από τη διόγκωση την προσθήκη ενός

στρώματος υδρόφοβου υλικού το οποίο δεν επηρεάζει τις επιθυμητές του ιδιότητες. Ο υδροφοβισμένος περλίτης έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα, μειωμένες απορροφητικές ιδιότητες και δεν επιβαρύνει τον ανθρώπινο οργανισμό.

Μεγάλες είναι οι εφαρμογές του διογκωμένου περλίτη στη θερμομόνωση, υπό μορφή μίγματος με τσιμέντο και νερό. Λόγω των πολύ καλών θερμομονωτικών ιδιοτήτων, τα μονωτικά στρώματα έχουν πολύ μικρό πάχος που έχει σαν συνέπεια εξοικονόμηση χώρου, μείωση των μονίμων φορτίων και βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς. Σαν στοιχείο σύγκρισης αναφέρεται ότι ο διογκωμένος περλίτης έχει θερμική αγωγιμότητα 0.04 (W/mK), το μπετόν 2.2 (W/mK), το τούβλο 0.72 (W/mK), το ξύλο δρυς 0.16 (W/mK), η πολυεστερίνη 0.072 (W/mK) και το λάστιχο 0.032 (W/mK) στους 300 K.

Χρησιμοποιείται επίσης στην πυροπροστασία καθώς συνδυάζει οικονομική και πρακτική πλευρά. Σε περίπτωση πυρκαγιάς εμποδίζεται η μετάδοση θερμότητας προς τα φέροντα δομικά στοιχεία, η οποία θα προκαλούσε ελάττωση της αντοχής του οπλισμού σε περιπτώσεις οπλισμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται επίσης στην ηχομόνωση, στην κατασκευή εκρηκτικών, στην ψύξη κ.α

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω η διόγκωση οφείλεται στην ύπαρξη υγρασίας, στην κρυσταλλική δομή του περλίτη. Ο διογκωμένος περλίτης είναι άσπρο, πορώδες υλικό με μορφή ποπ – κορν. Η διαμόρφωση αυτή γίνεται μεταξύ 760 και 1100°C.

Η διόγκωση πραγματοποιείται σε φούρνους οι οποίοι μπορεί να είναι οριζόντιοι, κατακόρυφοι, σταθεροί ή περιστρεφόμενοι. Στη βάση του φούρνου τοποθετείται ο καυστήρας, ο οποίος χρησιμοποιεί πετρέλαιο ή υγραέριο. Ο πιο συνηθής τύπος είναι ο κατακόρυφος. Τα καυσαέρια διαφεύγουν ανερχόμενα από την κορυφή της στήλης του φούρνου. Ο περλίτης τροφοδοτείται από πλευρικά σημεία πάνω από τον καυστήρα και

καθώς θερμαίνεται διογκώνεται και μεταφέρεται από τα ανερχόμενα καυσαέρια προς την κορυφή του φούρνου.

Πρέπει εδώ να σημειωθούν τέσσερις μεταβλητές που έχουν μεγάλη σημασία στη διαδικασία αυτή: φύση του πρωτογενούς περλίτη, μέγιστη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνονται τα σωματίδια του περλίτη, ποσοστό του νερού που ατμοποιήθηκε προτού τα σωματίδια θερμανθούν μέχρι το σημείο μαλακύνσεώς τους και κοκκομετρία αδιόγκωτου περλίτη.

Η εγκατάσταση στο εργαστήριο περιλαμβάνει τα εξής επιμέρους στοιχεία: Σιλό αδιόγκωτου περλίτη, σύστημα τροφοδοσίας, αγωγό τροφοδοσίας περλίτη, φούρνο διόγκωσης, κυκλώνα, αγωγό εξόδου καυσαερίων, σιλό αποθήκευσης περλίτη, καυστήρα φούρνου, μανόμετρο, προθερμαντήρα αέρα, βάνα στραγγαλισμού, ανεμιστήρα, ροόμετρο καυσίμου, βαλβίδα παροχής καυσίμου, δοχείο καυσίμου.

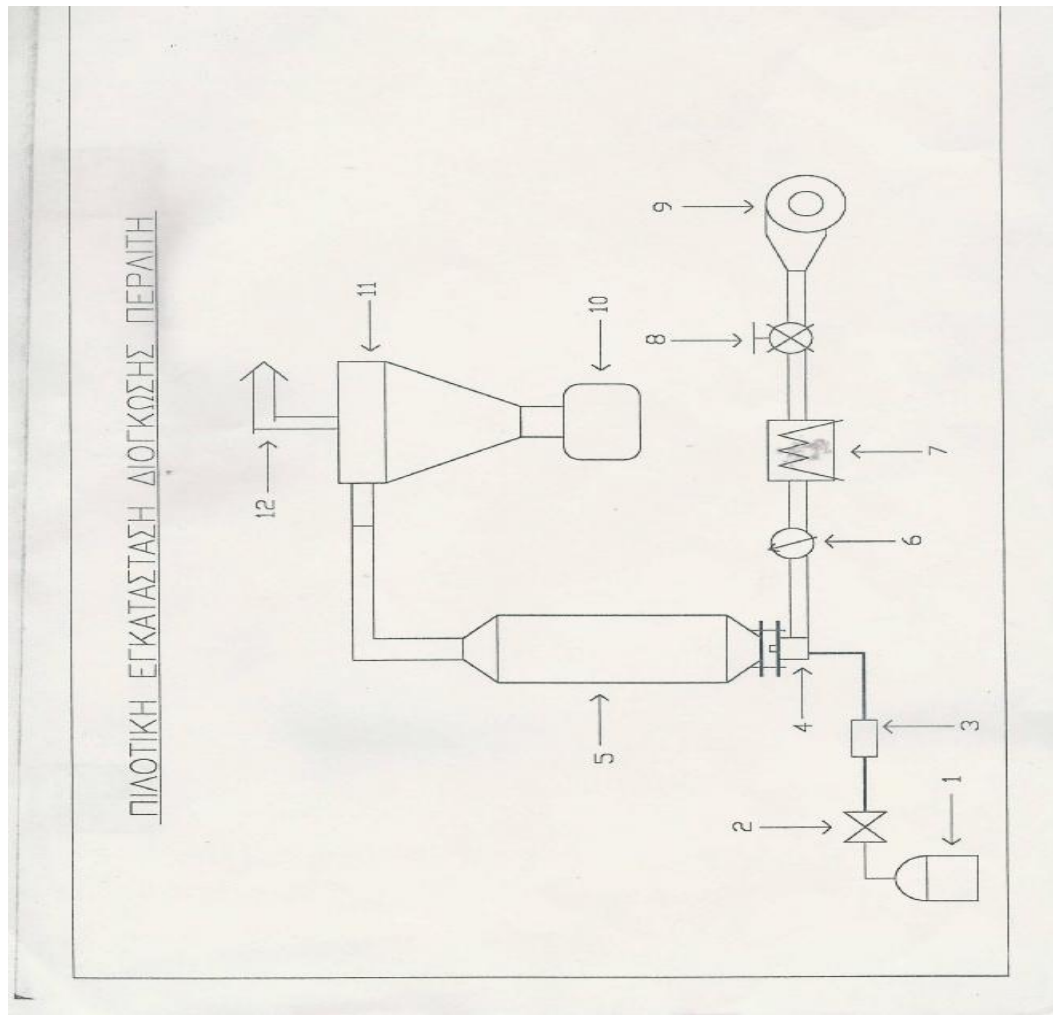
Ο περλίτης αρχικά είναι τοποθετημένος στο σιλό το οποίο βρίσκεται πάνω στο φούρνο διόγκωσης. Ο περλίτης στην αδιόγκωτη μορφή του τροφοδοτείται προς το φούρνο με ελεγχόμενη παροχή. Η τροφοδοσία του περλίτη διασπάται σε δύο άλλους αγωγούς οι οποίοι οδηγούν τον αδιόγκωτο περλίτη στο φούρνο από δύο αντιδιαμετρικά σημεία. Οι εργαστηριακές δοκιμές απαιτούν να έχουμε «μεταβλητό» μήκος των αγωγών τροφοδοσίας. Για το λόγο αυτό οι σωλήνες αυτές χωρίζονται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι σταθερό, όπως έρχεται από τον κύριο αγωγό τροφοδοσίας. Το δεύτερο είναι ένας αγωγός μεγαλύτερης διαμέτρου από τον πρώτο, ο οποίος μετακινείται κατά μήκος του πρώτου σωλήνα. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνεται «τηλεσκοπική» διάταξη του αγωγού τροφοδοσίας και έτσι μπορούμε να εισάγουμε περλίτη σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του φούρνου.

Για την εισαγωγή του περλίτη στο φούρνο έχει προβλεφθεί η ύπαρξη συρταρωτών υποδοχών κατά μήκος των γενέτειρων του κυλίνδρου του φούρνου. Οι υποδοχές αυτές έχουν ένα κεκλιμένο κυλινδρικό τμήμα που

προεξέρχει και μέσα στο οποίο μπαίνει ο αγωγός τροφοδοσίας και από εκεί εισέρχεται ο περλίτης στο φούρνο. Τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του φούρνου για να είναι εφικτή η αλλαγή του ύψους τροφοδοσίας. Για να είναι δυνατή η αλλαγή γωνίας τροφοδοσίας το κυλινδρικό τμήμα έχει κατασκευασθεί με διάφορες γωνίες κλίσεως π.χ 30° , 42° , 60° .

Στο τμήμα της εγκατάστασης με τον κυρίως φούρνο υπάρχουν πυρόμετρα – θερμοστοιχεία, που δίνουν τις θερμοκρασίες τόσο των τοιχωμάτων όσο και της φλόγας, τοποθετημένα σε πολλαπλά σημεία, έτσι ώστε να είναι δυνατή η γνώση των θερμοκρασιών λειτουργίας κάθε στιγμή. Στην πειραματική διάταξη, ο καυστήρας είναι τοποθετημένος στη βάση του φούρνου και χρησιμοποιείται αέριο καύσιμο, και συγκεκριμένα προπάνιο. Ακόμη υπάρχει ο κυκλώνας που κάνει το διαχωρισμό διογκωμένου περλίτη – καυσαερίων και τέλος το σιλό αποθήκευσης όπου αποθηκεύεται ο διογκωμένος περλίτης.

Ο περλίτης κατά την παραμονή του μέσα στο φούρνο, διογκώνεται και κατόπιν εξέρχεται μαζί με τα καυσαέρια που έχουν προκύψει από την κάυση. Οι διαστάσεις του φούρνου όπως και το σύστημα αερομεταφοράς έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε ο περλίτης να παραμένει κατάλληλο χρονικό διάστημα εντός του φούρνου για να επιτυγχάνεται η επιθυμητή προδιαγραφή ποιότητας και κοκκομετρίας. Μετά την έξοδο του μίγματος διογκωμένου περλίτη – καυσαερίων από τον φούρνο γίνεται ο διαχωρισμός των δύο φάσεων στον κυκλώνα. Έτσι κατακρατείται ο διογκωμένος περλίτης, ενώ τα καυσαέρια διαμέσου του αγωγού εξόδου οδηγούνται στο περιβάλλον.



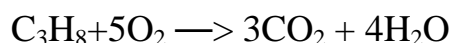
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ ΠΕΡΛΙΤΗ

- 1) δοχείο καυσίμου
- 2) βαλβίδα παροχής καυσίμου
- 3) ροόμετρο καυσίμου
- 4) καυστήρας φούρνου
- 5) φούρνος διόγκωσης
- 6) μανόμετρο
- 7) προθερμαντήρας αέρα
- 8) βάνο στραγγαλισμού
- 9) ανεμιστήρας
- 10) σιλό αποθήκευσης περλίτη
- 11) κυκλώνας
- 12) αγωγός εξόδου καυσαερίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑΣ
ΚΑΥΣΕΩΣ

3.1 ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΥΣΕΩΣ

Η αντίδραση καύσεως του προπανίου είναι η εξής:



Για 1 δηλαδή Kmole C_3H_8 απαιτούνται 5 Kmole O_2 και προκύπτουν 3 Kmole CO_2 και 4 Kmole H_2O ή αλλιώς για την καύση 44,094 Kg C_3H_8 απαιτούνται 160 Kg O_2 και παράγονται 132,03 Kg CO_2 και 72,064 Kg H_2O . Αυτά φυσικά αναφέρονται σε τέλεια καύση. Οι συντελεστές των διαφόρων συστατικών, στοιχείων ή ενώσεων για στοιχειομετρική καύση προκύπτουν ως εξής:

$$\mu_{\text{O}_2} = 160/44,094 = 3,629 \text{ Kg O}_2 / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 132,03/44,094 = 2,994 \text{ Kg CO}_2 / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 72,064/44,094 = 1,634 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{L}_\text{O}_\text{T}} = \mu_{\text{O}_2} / X_{\text{O}_2\text{L}} = 3,629/0,2321 = 15,635 \text{ Kg αέρα} / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{N}_2} = \mu_{\text{L}_\text{O}_\text{T}} \cdot X_{\text{N}_2\text{L}} = 15,635 \cdot 0,7679 = 12,006 \text{ Kg N}_2 / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{G}_\text{O}_\text{T}} = \mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{N}_2} = 15 \text{ Kg ξηρού καυσαερίου} / \text{Kg C}_3\text{H}_8$$

$$\mu_{\text{G}_\text{O}} = \mu_{\text{G}_\text{O}_\text{T}} + \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 16,634 \text{ Kg καυσαερίου} / \text{Kg καυσίμου}$$

Η σύσταση του αέρα είναι κατά μάζα:

$$X_{\text{O}_2\text{L}} = 0,2321 \text{ (Kg O}_2 / \text{Kg αέρα)}$$

$$X_{\text{N}_2\text{L}} = 0,7679 \text{ (Kg N}_2 / \text{Kg αέρα)}$$

Στην καύση ο αέρας θεωρείται ξηρός ($X_{\text{H}_2\text{O}_\text{L}} = 0$) και $\mu_{\text{L}_\text{O}_\text{T}} = \mu_{\text{L}_\text{O}} = 15,635 \text{ Kg αέρα} / \text{Kg C}_3\text{H}_8$.

Η παροχή του αέρα που χρησιμοποιήσαμε είναι $V_L = 11 \text{ m}^3/\text{h}$ και η πυκνότητά του $\rho_L = 1,185 \text{ Kg/m}^3$ επομένως η παροχή μάζας είναι $m_L = V_L \cdot \rho_L = 11 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,185 \text{ Kg/m}^3 = 13,035 \text{ Kg/h} = 0,00362 \text{ Kg/sec}$.

Υπολογισμός πυκνότητας αέρα.

Για θερμοκρασία περιβάλλοντος $25^{\circ}\text{C}=298\text{K}$, πίεση $1,01325 \cdot 10^5 \text{N/m}^2$ και σταθερά $R=0,2869 \text{KgK}$ η πυκνότητα του αέρα προκύπτει $1,185 \text{Kg/m}^3$.

Η παροχή καυσίμου είναι $V_B=0,95 \text{m}^3/\text{h}=0,000264 \text{m}^3/\text{sec}$. Η πυκνότητα του προπανίου στη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $\rho_B=\rho_{\text{C}_3\text{H}_8}=1,887 \text{Kg/m}^3$, οπότε η παροχή μάζας του καυσίμου είναι:

$$m_b=V_B \cdot \rho_B=0,000498 \text{Kg/sec}=1,7928 \text{ Kg/h.}$$

Η ποσότητα αέρα είναι $\mu_L=m_L/m_{B1}=m_L/(m_B \cdot n_E)=7,269 \text{Kg}$ αέρα / Kg καυσίμου, όπου ο βαθμός απόδοσης της εστίας λαμβάνεται ίσος με 1 λόγω της φύσης του καυσίμου. Επομένως ο λόγος αέρα καύσης είναι:

$$n= \mu_L/\mu_{L0}=0,465.$$

Ο λόγος κάυσης που υπολογίστηκε αφορά μόνο τον αέρα, που προσάγεται στον καυστήρα. Στην περίπτωση της ελεύθερης φλόγας τα στοιχεία δεν ισχύουν διότι υπάρχει ο αέρας του περιβάλλοντος με τον οποίο αντιδρά τοπικά το καύσιμο στα όρια της φλόγας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές που έχουν υπολογισθεί:

V_L	V_B	m_B	m_L	μ_{L0T}
$11 \text{m}^3/\text{h}$	$0,95 \text{m}^3/\text{h}$	$1,7928$ Kg/h.	$13,035 \text{ Kg/h}$	$15,635$ Kg/Kg
μ_{L0}	μ_L	n	μ_{O_2} (απαιτ.)	μ_{CO_2}
$15,635$ Kg/Kg	$7,269$ Kg/Kg	$0,465$	$3,629 \text{ Kg/Kg}$	$2,994 \text{ Kg/Kg}$
μ_{H_2O}	μ_{N_2}	μ_{GoT}	μ_{Go}	
$1,634 \text{ Kg/Kg}$	$12,006 \text{ Kg}$	15 Kg/Kg	$16,634$ Kg/Kg	

Υπολογισμός πυκνότητας στοιχειομετρικού καυσαερίου (ρ_G)

Οι ανηγμένες ποσότητες των προϊόντων που παράγονται στην καύση είναι:

$$\mu_{\text{CO}_2}=2,994 \text{ Kg CO}_2 / \text{ Kg καυσίμου}$$

$$\mu_{\text{H}_2\text{O}}=1,634 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{ Kg καυσίμου}$$

$$\mu_{\text{N}_2}=(1 - X_{\text{O}_2\text{L}}) \cdot \mu_{\text{L}_0\text{T}}=0,7679 \cdot 15,635=12,006 \text{ Kg N}_2 / \text{ Kg καυσίμου}$$

Οι περιεκτικότητες των διαφόρων συστατικών του καυσαερίου είναι:

$$X_{\text{CO}_2}=\mu_{\text{CO}_2}/\mu_{\text{G}_0}=2,994/16,634=0,18$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}}=\mu_{\text{H}_2\text{O}}/\mu_{\text{G}_0}=1,634/16,634=0,098$$

$$X_{\text{O}_2}=0$$

$$X_{\text{N}_2}=\mu_{\text{N}_2}/\mu_{\text{G}_0}=12,006/16,634=0,722$$

Οι σταθερές των παραπάνω είναι :

$$R_{\text{CO}_2}=0,1876\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$$

$$R_{\text{O}_2}=0,2596\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$$

$$R_{\text{H}_2\text{O}}=0,4529\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$$

$$R_{\text{N}_2}=0,2951\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$$

Η σταθερά του καυσαερίου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} R_{\text{G}_0} &= X_{\text{CO}_2} \cdot R_{\text{CO}_2} + X_{\text{O}_2} \cdot R_{\text{O}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}} \cdot R_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{N}_2} \cdot R_{\text{N}_2} = \\ &= 0,18 \cdot 0,1876 + 0 \cdot 0,2596 + 0,098 \cdot 0,4529 + 0,722 \cdot 0,2951 = \\ &= 0,291\text{KJ}/(\text{Kg}\cdot\text{K}) \end{aligned}$$

Σε θερμοκρασία 0°C η πυκνότητα του καυσαερίου είναι:

$$\rho_{\text{G}_0}=1,01325 \cdot 10^5 / 273 \cdot 0,291 \cdot 10^3 = 1,275\text{Kg}/\text{m}^3.$$

Σε θερμοκρασία $\theta^\circ\text{C}$ η πυκνότητα του καυσαερίου είναι:

$$\rho_{\text{G}}=\rho_{\text{G}_0}[273/(273+\theta)]$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ
ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

4.1. ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το θερμοστοιχείο (thermocouple) αποτελεί τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στην πράξη μεταλλάκτη μέτρησης θερμοκρασίας . Βασική αρχή επί της οποίας στηρίχθηκε η κατασκευή του θερμοστοιχείου, απετέλεσε η παρατήρηση του T.J. Seebeck (1770-1831), το έτος 1821, σύμφωνα με την οποία:

Αν δύο μεταλλικοί αγωγοί, οπωσδήποτε διαφορετικών υλικών, έλθουν σε επαφή, τότε στα άκρα τους αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Η ηλεκτρεγερτική αυτή δύναμη, οφείλει την ύπαρξή της σε καθαρά θερμικά αίτια. Το μέγεθός της εξαρτάται από το είδος των υλικών των δύο μεταλλικών αγωγών και από την θερμοκρασία που επικρατεί στο σημείο επαφής τους.

Η πιο πάνω παρατήρηση του Seebeck φέρει και την ονομασία θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, η δε αναπτυσσόμενη ΗΕΔ ονομάζεται και θερμοηλεκτρική τάση. Έχει καταστεί ήδη προφανές ότι εάν μετρηθεί η θερμοηλεκτρική τάση, που παράγεται από ζεύγος διαφορετικών αγωγών, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του σημείου επαφής των, τότε, η επαφή αυτή μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί απευθείας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, δοθέντος ότι ισχύει:

$$e = k(T) \cdot T \quad (1)$$

όπου e η θερμοηλεκτρική τάση $k(T)$ συνάρτηση εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και το ζεύγος μετάλλων των δύο αγωγών, και T η θερμοκρασία στο σημείο επαφής.

Για να μετρηθεί όμως η θερμοηλεκτρική τάση, η οποία παράγεται στο σημείο επαφής των δύο μεταλλικών αγωγών, θα πρέπει να συνδεθεί ένα βολτόμετρο. Εξυπακούεται ότι το βολτόμετρο θα συνδεθεί μέσω επιπλέον μεταλλικών αγωγών, σχηματίζοντας έτσι ένα «θερμοηλεκτρικό κύκλωμα».

Για την ανάλυση ενός θερμοηλεκτρικού κυκλώματος έχει διατυπωθεί κανόνας, στηριζόμενος ουσιαστικά στο δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, σύμφωνα με το οποίο:

- Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται από θερμοηλεκτρικό κύκλωμα προκύπτει ως αλγεβρικό άθροισμα των επί μέρους θερμοηλεκτρικών τάσεων, των αναπτυσσομένων στα σημεία επαφής των συγκροτούντων το κύκλωμα αγωγών.

- Αν όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία, τότε η αναπτυσσόμενη τάση από το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα ΗΕΔ έχει τιμή ίση με το μηδέν.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ένδειξη e του βολτόμετρου θα ισούται:

$$e = (e_{AB})_{T(M)} + (e_{BG})_{T(R)} + (e_{GA})_{T(R)} \quad (2)$$

όπου $T(M)$: η θερμοκρασία στο σημείο μετρήσεως, όπου τοποθετείται η επαφή των δύο αγωγών του θερμοστοιχείου. Η θερμοκρασία $T(M)$ ονομάζεται και θερμοκρασία μετρήσεως.

$T(R)$: η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται και οι δύο επαφές των αγωγών του θερμοστοιχείου με τους αγωγούς του μοναδικού τρίτου μετάλλου, με τους οποίους το θερμοστοιχείο συνδέεται προς το όργανο μετρήσεως. Η θερμοκρασία $T(R)$ ονομάζεται και θερμοκρασία αναφοράς.

Αν υποθεθεί ότι η ίδια θερμοκρασία $T(R)$ που επικρατεί στο σημείο αναφοράς, επικρατεί και στο σημείο μετρήσεως, δηλαδή όλα τα σημεία επαφής βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (T), τότε θα ισχύει:

$$e = (e_{AB})_{T(R)} + (e_{BG})_{T(R)} + (e_{GA})_{T(R)} = 0 \quad (3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2) και (3) παίρνουμε:

$$e = (e_{AB})_{T(M)} - (e_{AB})_{T(R)} \quad (4)$$

Δηλαδή, η ένδειξη του βολτόμετρου ισούται με τη διαφορά των θερμοηλεκτρικών τάσεων, που παράγονται από το ζεύγος των αγωγών του θερμοστοιχείου, που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες του σημείου

μετρήσεως και του σημείου αναφοράς. Πρέπει να επισημανθεί ότι το πολύ σημαντικό συμπέρασμα που εκφράζει η εξίσωση (4) ισχύει μόνο εφόσον:

- αμφοτέροι οι αγωγοί του θερμοστοιχείου συνδέονται με την μετρητική διάταξη με ένα μόνο είδος μεταλλικού αγωγού,
- αμφοτέρες οι επαφές του αγωγού συνδέσεως με τους δύο αγωγούς του θερμοστοιχείου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (θερμοκρασία αναφοράς).

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η συνάρτηση $k(T)$ επιτρέπει την αναγωγή θερμοκρασιών σε ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις Seebeck, και αντιστρόφως, ανάλογα με το είδος του θερμοστοιχείου που χρησιμοποιείται. Η υπόψη συνάρτηση δίνεται συνήθως υπό μορφή πινάκων, για τα διάφορα είδη θερμοστοιχείων. Οι πίνακες αυτοί δίνουν την ηλεκτρεγερτική δύναμη στο σημείο μετρήσεως, με βάση ότι:

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο σημείο αναφοράς, όταν η θερμοκρασία του είναι 0°C , είναι 0V .

Η πιο πάνω σύμβαση επιτρέπει την χωρίς χρονοτριβή μέτρηση και μετατροπή, με βάση τη σχέση (1), δηλαδή: $e = e_M = k(T) \cdot T$, εφόσον η επαφή αναφοράς διατηρείται τεχνητά στην θερμοκρασία των 0°C , δηλαδή σε περιβάλλον τηκόμενου πάγου. Για το λόγο αυτό το σημείο αναφοράς συχνά ονομάζεται και σημείο πάγου (ice point). Παλαιότερα, αλλά ακόμη και σήμερα, σε πολλά εργαστήρια, οι επαφές αναφοράς διατηρούνταν πράγματι μέσα σε θερμικά μονωμένο δοχείο (δοχείο dewar) όπου τήκεται πάγος. Με την ανάπτυξη των ημιαγωγών όμως τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευασθεί «ηλεκτρονικά σημεία πάγου». Οι πολύ μικρές σε μέγεθος αυτές μονάδες συγκροτούνται από ένα τρανζίστορ ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας, που αντισταθμίζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη του σημείου αναφοράς, που πλέον βρίσκεται στο ελεύθερο περιβάλλον.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση $k(T)$ για συγκεκριμένο ζεύγος θερμοστοιχείου είναι σε διάφορα όρια θερμοκρασιών πρακτικά σταθερά. Ο παρακάτω πίνακας παρέχει χρήσιμα στοιχεία k , στην περιοχή $0-100^{\circ}\text{C}$. Ας σημειωθεί επίσης ότι στον πίνακα δίνεται και το πρόσημο του δυναμικού των δύο μεταλλικών αγωγών κάθε θερμοστοιχείου.

<u>ΤΥΠΟΣ (Σύμβ.</u> <u>ANSI)</u>	<u>ΥΛΙΚΑ ΑΓΩΓΩΝ</u>	<u>ΕΜΠΟΡΙΚΗ</u> <u>ΟΝΟΜΑΣΙΑ</u>	<u>ΠΕΡΙΟΧΗ</u> <u>ΛΕΙΟΤΟΥΡΓΙΑΣ (°C)</u>	<u>k (0 - 100°C)</u> <u>μ V/°C</u>	<u>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>
J	Fe Cu (55%) – Ni (45%)	(+) Iron (-) Constantan	-210 ως 1200 (0 ως 700)	52.7	Κατάλληλο για χρήση σε αναγωγικό περιβάλλον.
K	Ni (90%) – Cr (10%) Ni (95%) – Al (2%) Mn (2%)	(+) Chromel (-) Alumel	-270 ως 1370 (0 ως 1100)	41.0	Κατάλληλο για χρήση σε καθαρά αναγωγικό περιβάλλον.
T	Cu Cu (55%) – Ni (45%)	(+) Copper (-) Constantan	-270 ως 400 (-185 ως 300)	42.8	Κατάλληλο για χρήση σε ελαφρά αναγωγικό και οξειδωτικό περιβάλλον. Κατάλληλο για λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες.
E	Ni (90%) – Cr (10%) Cu (55%) – Ni (45%)	(+) Chromel (-) Constantan	-270 ως 1000 (0 ως 800)	63.2	Κατάλληλο για χρήση σε κενό ή αδρανή ατμόσφαιρα.
R	Pt (87%) – Rh (13%) Pt	(+) Platinum – 13% rhodium (-) Platinum	-50 ως 1767 (0 ως 1600)	6.5	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση.

<u>ΤΥΠΟΣ (Σύμβ.</u> <u>ANSI)</u>	<u>ΥΛΙΚΑ ΑΓΩΓΩΝ</u>	<u>ΕΜΠΟΡΙΚΗ</u> <u>ΟΝΟΜΑΣΙΑ</u>	<u>ΠΕΡΙΟΧΗ</u> <u>ΛΕΙΟΤΟΥΡΓΙΑΣ (°C)</u>	<u>k (0 - 100°C)</u> <u>μ V/°C</u>	<u>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</u>
S	Pt (90%) – Rh (10%) Pt	(+) Platinum – 10% rhodium (-) Platinum	-50 ως 1767 (0 ως 1600)	6.4	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση.
B	Pt (70%) – Rh (30%) Pt (94%) – Rh (6%)	(+) Platinum – 30% rhodium (+) Platinum – 6% rhodium	0 ως 1820 (100 ως 1600)	≈ 0.4	Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση.

4.2 ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΕ ΦΛΟΓΕΣ

4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της ακρίβειας μέτρησης θερμοκρασιών με γυμνά θερμοστοιχεία και πυρόμετρα αναρρόφησης χρησιμοποιούνται μετρήσεις θερμοκρασιών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια πειραμάτων σε αξονοσυμμετρική φλόγα με υγρό καύσιμο . Τα δεδομένα είχαν ληφθεί για να βρεθεί η επίδραση της δομής και του εύρους της ταχύτητας αναρροφήσεως στην ακρίβεια των ενδείξεων των πυρομέτρων. Η ανάλυση των λαθών στις ενδείξεις έγινε για διαφορετικές καταστάσεις και διαφορετικές τοποθετήσεις των συνδέσεων στη φλόγα.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας με γυμνά θερμοστοιχεία σε αξονοσυμμετρικές φλόγες είχαν οδηγήσει σε σοβαρά λάθη τα οποία μπορούσαν να ανατρέψουν κάθε προσπάθεια για τον ακριβή υπολογισμό της μεταφοράς και συναλλαγής θερμότητας. Μια σύνδεση θερμοστοιχείου εκτεθειμένη σε υψηλές θερμοκρασίες και πιθανόν περικλειόμενη από τοιχώματα ευρισκόμενα σε χαμηλή θερμοκρασία βρέθηκε ότι μπορεί να παρουσιάσει ένδειξη με λάθος αρκετών εκατοντάδων βαθμών.

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να μελετήσει τα λάθη στις μετρήσεις θερμοκρασίας που παίρνονται με γυμνά θερμοστοιχεία σε διαφορετικά σημεία. Η επίδραση των διαφορετικών γεωμετρικών και λειτουργικών θέσεων στην ακρίβεια των πυρομέτρων αναρροφήσεως εξετάζεται και αυτή. Τέλος υπάρχει μια προσπάθεια να αναπτυχθεί μια γενική μέθοδος διορθωτική για τις ενδείξεις των θερμοστοιχείων.

4.2.2 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΠΥΡΟΜΕΤΡΑ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ

Οι ενδείξεις των πυρομέτρων βρέθηκε ότι επηρεάζονται από την τιμή της ταχύτητας αναρρόφησης, από το υλικό και τις διαστάσεις της θωράκισης και από τη θέση της σύνδεσης, ενώ βρέθηκε ότι η θέση του πυρομέτρου δεν επηρεάζει την ακρίβεια των ενδείξεων. Υπάρχει μια ελάχιστη τιμή ταχύτητας η οποία είναι αναγκαία για να ληφθούν αποτελέσματα σωστά από την λειτουργία του πυρομέτρου και αυτή η ταχύτητα αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας που μετράται. Για τις διάφορες θερμοκρασίες η απαιτούμενη ταχύτητα αναρροφήσεως ποικίλει από 180 έως 300 m/s.

Πράγματι υψηλή θερμοκρασία χρειάζεται υψηλή ταχύτητα αναρροφήσεως. Η μεταφορά μεγάλων ποσών θερμικής ενέργειας από τα αέρια στη σύνδεση μέσω συναγωγής συνοδεύεται από υψηλές απώλειες λόγω ακτινοβολίας και αγωγής. Η αύξηση της ταχύτητας αναρρόφησης συνοδεύεται με μια αύξηση στην μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στα αέρια και τη σύνδεση με αποτελέσματα χαμηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα αέρια και τις ενδείξεις του πυρομέτρου. Αυτή η διαφορά πλησιάζει το μηδέν σε υψηλές ταχύτητες αναρροφήσεως (σχετική καμπύλη από πειραματικές μετρήσεις δείχνει ασυμπτωτική συμπεριφορά).

Όσον αφορά την επίδραση της θέσης συνδέσεως, η καλύτερη θέση της συνδέσεως είναι μέσα στη θωράκιση. Η τοποθέτηση της συνδέσεως έξω από τη θωράκιση αυξάνει την κωνική γωνία της κατεύθυνσης ακτινοβολίας και την ίδια ώρα η σύνδεση βρίσκεται σε μια χαμηλή περιοχή ταχύτητας. Το τράβηγμα της σύνδεσης προς το σχετικά κρύο τέλος της θωράκισης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας και αγωγής.

Η επίδραση του μήκους της θωράκισης ελέγχθηκε και βρέθηκε ότι το κατάλληλο μήκος θωράκισης είναι οχτώ (8) φορές η εσωτερική διάμετρος

της. Τα αναρροφούμενα αέρια θερμαίνουν τη θωράκιση (σε συνδυασμό με τη θέρμανση της σύνδεσης) και σ' αυτή την περίπτωση η σύνδεση βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία με μικρές απώλειες λόγω ακτινοβολίας. Για πολύ μακριές θωρακίσεις τα αναρροφούμενα αέρια δεν επαρκούν να θερμάνουν πολύ τη θωράκιση ενώ για πολύ κοντές θωρακίσεις η υψηλή αγωγιμότητα θερμότητας οδηγεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Από μετρήσεις έχει βρεθεί ότι σε κατανομή θερμοκρασίας – ταχύτητας για κεραμική και χαλύβδινη θωράκιση, οι μεγαλύτερες τιμές έχουν ληφθεί για κεραμική θωράκιση. Αυτό οφείλεται σε χαμηλότερη ικανότητα ακτινοβολίας των κεραμικών και ως εκ τούτου σε χαμηλότερες απώλειες της θωράκισης λόγω ακτινοβολίας. Επίσης έχει βρεθεί ότι οι ενδείξεις θερμοκρασίας βελτιώνονται με τη χρησιμοποίηση θωράκισης. Αυτό οφείλεται στη χαμηλότερη κλίση της θερμοκρασίας κατά μήκος της θωράκισης που έχει σαν αποτέλεσμα υψηλή θερμοκρασία για τον εσωτερικό τοίχο της θωράκισης.

4.2.3 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΓΥΜΝΑ ΣΥΡΜΑΤΙΝΑ ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ (BARE WIRE THERMOCOUPLE)

Σε μερικές περιπτώσεις γυμνά συρμάτινα ή θερμοστοιχεία μιας θωράκισης χρησιμοποιούνται για μετρήσεις θερμοκρασίας και είναι ενδιαφέρον να γνωρίζουμε το μέγεθος των λαθών στις ενδείξεις των θερμοστοιχείων καθώς συγκρίνονται με τις ενδείξεις των πυρομέτρων αναρρόφησης. Το σφάλμα σ' αυτή την περίπτωση εκφράζεται ως:

$$\text{Σφάλμα επί τοις εκατό} = [(t_{s,p} - t_b) / t_{s,p}] \cdot 100\% \quad (1)$$

Το λάθος αυτό δεν είναι σταθερό για τη διατομή του φούρνου (περίπτωση φλόγας σε φούρνο) και αποκτά τη μέγιστη τιμή μακριά από το κέντρο της φλόγας. Βρέθηκε ότι οι λειτουργικές συνθήκες όπως η

αναλογία αέρα – καυσίμου και η αναλογία ρευστής μάζας επηρεάζουν λίγο το σφάλμα στο κέντρο της φλόγας. Μακριά από το κέντρο της φλόγας όπως παρατηρήθηκε η επίδραση αναλογίας αέρα – καυσίμου στο σφάλμα αυξάνει με την αύξηση της αναλογίας καυσίμου – αέρα. Η επίδραση της αναλογίας ρευστής μάζας παρατηρήθηκε μόνο μακριά από το κέντρο της φλόγας (κοντά στα τοιχώματα του φούρνου). Από κατανομή των καμπυλών σφάλματος φαίνεται ότι το σφάλμα μεταβάλλεται από 20 – 30% στο κέντρο έως 70 % κοντά στην αρχή μετρήσεως. Αυτή η μεταβολή σφάλματος οφείλεται σε μεγάλες διαφορές της θερμοκρασίας και της κλίσης της όπως επίσης της ταχύτητας για διαφορετικές θέσεις στη φλόγα.

4.2.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Σ' αυτή την παράγραφο υπάρχει μια διορθωτική μεθοδολογία για τις ενδείξεις των γυμνών θερμοστοιχείων και τον προσδιορισμό της μεταφοράς θερμότητας η οποία επηρεάζει τις ενδείξεις των πυρόμετρων αναρρόφησης.

Πυρόμετρα αναρροφήσεως.

Με τη βοήθεια θερμικού ισολογισμού σε πυρόμετρο αναρροφήσεως σε εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες έχουν ληφθεί οι ακόλουθες εκφράσεις:

$$C_{(g-s)i} = D_{i-o} \quad (1)$$

$$\text{και } D_{i-o} + C_{(g-s)o} = R_{s-wa} \quad (2)$$

όπου τα σύμβολα C,D,E αναφέρονται σε μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Οι ακόλουθες σχέσεις εκφράζουν τα προηγούμενα φαινόμενα:

$$(T_g - T_o) / [1/r_i h_{c,i} + (1nr_o/r_o)/k_s] + r_o h_{c,o} (T_g - T_o) = r_o \sigma (\epsilon_s T_o^4 - \epsilon_{wa} T_{wa}) \quad (3)$$

και

$$T_i = [T_g + k_s T_o / (r_o h_{c,i} \ln r_o / r_i)] / [1 + k_s / r_o h_{c,i} \ln r_o / r_i] \quad (4)$$

Επίσης από το θερμικό ισολογισμό στην ένωση του πυρομέτρου αναρροφήσεως προκύπτει:

$$C_{g-i} = R_{j-s} + D_{j-w} \quad (5)$$

Η σχέση (5) παίρνει τη μορφή:

$$h_c A_j (T_g - T_{s,p}) = A_j \sigma (\epsilon_j T_{s,p}^4 - \epsilon_s T_i^4) + K_w A_w (T_{s,p} - T_{wa}) / z \quad (6)$$

Το ακάλυπτο μήκος z θα μπορούσε να ληφθεί ως το μήκος της διαδρομής αερίου στο πυρόμετρο. Ο συντελεστής της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής δίνεται ως εξής: $Nu = 0,2 \cdot Re^{0,8}$ (7)

Οι σχέσεις (3), (4), (6) και (7) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για την εύρεση της σωστής θερμοκρασίας αερίου.

Γυμνά συρμάτινα θερμοστοιχεία.

Από ισολογισμό παίρνουμε:

$$R_{j-wa} + D_{j-w} = C_{g-i} + R_{f-i} \quad (8)$$

Οι δείκτες i , g , f , w και wa αναφέρονται στην ένωση, στο αέριο, στην περιοχή φλόγας, στο θερμοστοιχείο και στον τοίχο αντίστοιχα. (Τα σύμβολα επεξηγούνται στην επόμενη σελίδα). Η σχέση 8 παίρνει την μορφή:

$$A_j \sigma (\epsilon_j T_b^4 - \epsilon_{wa} T_{wa}^4) + K_w A_w (T_b - T_{wa}) / z = h_c A_j (T_g - T_b) + A_j \sigma (\epsilon_f T_f^4 - \epsilon_j T_b^4) \quad (9)$$

όπου z είναι το ακάλυπτο μήκος. Για θέσεις μέσα σε φούρνο αυτό το μήκος λαμβάνεται από τη θέση της ένωσης προς τον υδροθάλαμο ψύξης (τέσσερα εκατοστά στην παρούσα κατασκευή), αλλά για θέσεις κοντά στα τοιχώματα λαμβάνεται ως η απόσταση από την ένωση στον τοίχο.

Για το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, από τα αέρια στην ένωση προκύπτει η σχέση:

$$Nu=(0,44\pm 0,06)\cdot Re^{0,5} \quad (10)$$

Η παραπάνω σχέση προσδιορίστηκε εμπειρικά. Μια άλλη μορφή είναι:

$$Nu=(1,72\pm 0,1)/(2y+1/y)^{1/3}\cdot Re^{0,5} \quad (11)$$

Επίσης μπορεί να ληφθεί και η ακόλουθη μορφή:

$$T_g=T^b+(2,866/k_g)\cdot \varepsilon_j(T_b/100)^4(d_j u_g/p_g v_g)^{0,5}(2y+1/y)^{1/3}+ \\ \{[0,291(2y+1/y)^{1/3}]/z\}\cdot(K_w/K_g)\cdot(d_w/d_j)^2\cdot(d_j u_g/p_g v_g)^{0,5}(T_b-T_{wa}) \quad (12)$$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από όσα αναφέρθηκαν συμπεραίνουμε ότι οι ενδείξεις των γυμνών θερμοστοιχείων μπορεί να παρουσιάζουν ένα σφάλμα της τάξης του 25 % για τις περισσότερες θέσεις στη φλόγα, ενώ αυτό αυξάνεται κατά πολύ κοντά στα τοιχώματα σε περίπτωση φλόγας σε φούρνο εξαιτίας υψηλών απωλειών αγωγής. Όσον αφορά την κατασκευή των πυρομέτρων αναρροφήσεως, φαίνεται ότι το πάχος και το μήκος της θωρακίσεως, το υλικό και η θέση της σύνδεσης επηρεάζουν την ακρίβεια των ενδείξεων των πυρομέτρων και πρέπει να είναι σωστά επιλεγμένα. Επίσης φαίνεται ότι η ταχύτητα αναρροφήσεως δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 300 m/s ώστε να εξασφαλιστεί υψηλή ακρίβεια των ενδείξεων πυρομέτρων αναρροφήσεως.

Επεξήγηση συμβόλων

A: εμβαδό (area, m²)

d: διάμετρος σύνδεσης (wire and junction diameter, m)

C: μεταφορά θερμικής ισχύος μέσω συναγωγής (convection heat flux, KW)

D: διάμετρος θαλάμου καύσεως (combustion chamber diameter) και θερμοροή μέσω αγωγής (conduction heat flux, KW)

h_c : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (heat transfer coefficient, KW/m²K)

k: θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity, KW/mK)

L: μήκος (length, m)

Nu: αριθμός Nusselt (Nusselt number, $Nu=h_c d/k$, -)

R: μεταφορά θερμικής ισχύος με ακτινοβολία (radiation heat flux, KW)

r: ακτινική απόσταση από τον άξονα του φούρνου (radial distance from furnace axis, m)

Re: αριθμός Reynolds number, $Re=\rho v d/\mu$, -)

r_o : ακτίνα του φούρνου (radius of the furnace, m)

t, T: θερμοκρασία (temperature, °C, K)

T_i : θερμοκρασία εσωτερικού τοιχώματος της θωράκισης (inner wall temperature of the shield, K)

T_o : θερμοκρασία εξωτερικού τοιχώματος της θωράκισης (outer wall temperature of the shield, K)

v: ταχύτητα (velocity, m/s)

x: αξονική απόσταση από την έξοδο του φούρνου (axial distance from burner exit, m)

y: θέση κεφαλής (σύνδεσης) θερμοστοιχείου από τα τοιχώματα του φούρνου (location of junction from furnace wall, cm)

z: εκτεθειμένο μήκος θερμοστοιχείου (exposed length of the thermocouple, m)

ϵ : συντελεστής εκπομπής (emissivity, -)

ρ : πυκνότητα (density, Kg/m³)

σ : σταθερά Boltzmann (Boltzmann constant $\sigma=4.93 \cdot 10^{-8}$ KW/ m²K⁴)

μ : δυναμικό ιξώδες (dynamic viscosity, Kg/ms)

Επεξήγηση δεικτών

b: γυμνό συρμάτινο θερμοστοιχείο (bare wire thermocouple)

f: φλόγα (flame)

g: αέριο (gas)

i: εσωτερικός (inner)

j: ένωση (junction)

o: εξωτερικός (outer)

s: θωράκιση (shield)

s.p: πυρόμετρο αναρρόφησης (sunction pyrometer)

w: σύρμα του θερμοστοιχείου (wire of the thermocouple)

wa: τοίχωμα φούρνου (wall of the furnace)

4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΜΕΣΩ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Οι μετρήσεις στα πειράματα αυτά έγιναν με τη βοήθεια υπολογιστή. Το απαραίτητο HARDWARE αποτελείται από αισθητήριο, καλώδιο χαμηλής ειδικής αντίστασης, ηλεκτρονικό εξάρτημα ενίσχυσης σήματος, κάρτα υποδοχής σήματος, μετρητική κάρτα.

Το αισθητήριο είναι πυρόμετρο αναρροφήσεως τύπου B ή K ανάλογα με το αν η μέτρηση αφορά θερμοκρασία φλόγας ή περιβάλλοντος. Το σήμα μέσω του καλωδίου φτάνει στο ηλεκτρονικό εξάρτημα όπου ενισχύεται, φιλτράρεται και αποκτά εύρος (στην έξοδο) από 0 έως 5V.

Το ηλεκτρονικό εξάρτημα (module) είναι μοντέλο 5B37-K-02 τύπου ISOLATED TYPE K TC INPUT για πυρόμετρο K και μοντέλο 5B37-B-06 τύπου ISOLATED TYPE B TC INPUT για πυρόμετρο B, της ANALOG DEVICES . Υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού module της ίδιας κατηγορίας με πυρόμετρα – θερμοστοιχεία τύπου J, K, T, E, R, S, B,

N, C με εύρος θερμοκρασίας περιβάλλοντος από -40 έως 85°C. Η θερμοκρασία εισόδου μπορεί να κυμαίνεται από -100 έως 1350°C για το 5B37-K-02 και από 0 έως 1800°C για το 5B37-B-06. Η ακρίβεια που παρέχει είναι της τάξεως 0,25°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C, ενώ για κάθε °C αντιστοιχεί απόκλιση $\pm 0,0025\%$.

Η κάρτα υποδοχής σήματος (Κ.Υ.Σ.) είναι τύπου 5B01 ANALOG DEVICES και έχει δεκαέξι (16) υποδοχές – κανάλια που αντιστοιχούν σε δεκαέξι πυρόμετρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος -40 έως 85 °C και η ακρίβεια που παρέχει είναι $\pm 0,25$ °C για 25 °C ενώ η απόκλιση για κάθε °C ανάγνωσης είναι $\pm 0,0125$ °C (μέγιστη απόκλιση $\pm 0,75$ °C). Οι μηχανικές διαστάσεις της κάρτας υποδοχής σήματος μαζί με τα module είναι 88,9 mm X 442 mm X 81,3 mm. Στο σύστημα που χρησιμοποιούμε υπάρχουν τέσσερα (4) ενεργά κανάλια, για τέσσερα δηλαδή πυρόμετρα, τρία τύπου B και ένα τύπου K.

Στη συνέχεια το σήμα φτάνει στη μετρητική κάρτα όπου μετατρέπεται από αναλογικό σε ψηφιακό. Η μετρητική κάρτα που χρησιμοποιούμε είναι τύπου DEVICESPC-LPM-16 της NATIONAL INSTRUMENTS.

Το λογισμικό LABVIEW της NATIONAL INSTRUMENTS που χρησιμοποιούμε έχει έτοιμες ρουτίνες επικοινωνίας σε γραφική γλώσσα προγραμματισμού, χρησιμοποιεί δηλαδή κώδικα σε μορφή εικονιδίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο θόρυβος ο οποίος περιέχεται στο σήμα κόβεται μέσω φίλτρων με τη βοήθεια του LABVIEW.

Γενικά η αντιστάθμιση – διόρθωση του σήματος (compensation) γίνεται με δύο τρόπους, μέσω hardware επιτυγχάνεται μέσω μιας μεταβαλλομένης πηγής τάσεως που παρεμβάλλουμε στο κύκλωμα η οποία παράγει τάση που αναλογεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η τάση αυτή προστίθεται στην τάση σήματος και το σήμα που παίρνουμε αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του θερμοστοιχείου. Για κάθε θερμοστοιχείο – πυρομέτρο

απαιτείται ξεχωριστό κύκλωμα της μορφής αυτής πράγμα που αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης.

Η διόρθωση μέσω software (όπως έγινε και στα πειράματά μας) που υπερτερεί σε ακρίβεια από την προηγούμενη μέθοδο γίνεται με πρόσθεση της κατάλληλης τιμής τάσεως. Το πρόγραμμα LABVIEW της NATIONAL INSTRUMENTS, το Labwindows και το NI-DAQ περιέχουν ρουτίνες μέσω των οποίων γίνεται η διαδικασία διόρθωσης του σήματος. Η μετατροπή αυτή γίνεται είτε με απ' ευθείας πρόσθεση τάσης είτε με πρόσθεση τιμής θερμοκρασίας.

Το σύστημα περιέχει αρκετές παραμέτρους δειγματοληψίας. Αυτές που χρησιμοποιούμε εμείς είναι οι ακόλουθες: επιλογή αριθμού μετρήσεων, επιλογή αριθμού μετρήσεων ανά δειγματοληψία, επιλογή καναλιού. Με τον αριθμό μετρήσεων μας δίνεται η δυνατότητα να καθορίσουμε τις μετρήσεις που θα κάνει το σύστημα. Με τον αριθμό μετρήσεων ανά δειγματοληψία καθορίζουμε το πόσες φορές σκανάρει το σύστημα σε κάθε μέτρηση. Δηλαδή οι συνολικές μετρήσεις που γίνονται είναι το γινόμενο των δύο προηγούμενων επιλογών. Στα πειράματα έχουμε αριθμό μετρήσεων εκατό (100) ή πενήντα (50) και αριθμό μετρήσεων ανά δειγματοληψία εκατό (100).

Με την επιλογή καναλιού βλέπουμε τα αποτελέσματα σε όποιο κανάλι επιθυμούμε τόσο κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων όσο και μετά το τέλος τους. Στο κανάλι μηδέν (0) έχουμε πυρόμετρο τύπου K που δείχνει την θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ στο κανάλι ένα (1) πυρόμετρο τύπου B που δείχνει τη θερμοκρασία της φλόγας.

Το πρόγραμμα δείχνει το αναλογικό σήμα του καναλιού και τρία (3) διαγράμματα, ένα για τη μέση τιμή, ένα για την RMS, και ένα για την τυπική απόκλιση. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα ενδείξεως των τιμών των παραπάνω μεγεθών σε κάθε δειγματοληψία. Εκτός απ' αυτό δίνει τη

δυνατότητα να δούμε τις χρονικές στιγμές των μετρήσεων (κάθε μέτρηση σε τι χρονική στιγμή αντιστοιχεί).

Το διάγραμμα που παίρνουμε (θερμοκρασία – χρόνος) έχει συνεχή γραμμή αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι έχουμε το χαρακτηριστικό συνεχείας της συνάρτησης θερμοκρασίας σε σχέση με το χρόνο. Το πρόγραμμα υπολογίζει διακριτές τιμές θερμοκρασίας (ο αριθμός τους καθορίζεται από την επιλογή “αριθμός μετρήσεων”) και τις εμφανίζει ενωμένες. Τα σημεία δηλαδή του διαγράμματος που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες είναι οι κορυφές ή αλλιώς τα σημεία όπου αλλάζει η κλίση της ευθείας.

Για να κάνουμε μία μέτρηση ακολουθούμε την εξής διαδικασία: πάμε στην επιλογή operate και ενεργοποιούμε την εντολή Reinitialize All. Το Default για να μηδενιστούν οι παράμετροι του συστήματος . Κατόπιν συμπληρώνουμε τις παραμέτρους που αναφέραμε και τρέχουμε το πρόγραμμα με το πρώτο εικονίδιο από αριστερά που παριστάνει βέλος. Όταν ολοκληρωθούν οι μετρήσεις μπορούμε να δούμε όποιο διάγραμμα επιθυμούμε ή τις διακριτές τιμές των δειγματοληψιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

1. Κάνουμε αλφάδιασμα του καυστήρα στην κατάλληλη διεύθυνση (είτε παράλληλη στο πυρόμετρο είτε κάθετη).
2. Τοποθέτηση πυρομέτρου στο σωστό ύψος.
3. Ρύθμιση πυρομέτρου ώστε να κινείται πάνω σε διάμετρο του καυστήρα (να περνάει δηλαδή απ' το κέντρο του καυστήρα).
4. Τοποθετούμε την άκρη του πυρομέτρου σε απόσταση 10cm από το κέντρο του καυστήρα και σημειώνουμε πάνω στο εργαλειοφορείο το σημείο αυτό ως αφετηρία της διαδρομής του πυρομέτρου (η αφετηρία βρίσκεται πάντοτε προς την πλευρά του εργαλειοφορείου).
5. Θέτουμε σε λειτουργία τον ανεμιστήρα.
6. Εφαρμόζουμε τη διαδικασία έναυσης καυστήρα.
7. Σταθεροποιούμε τη φλόγα στις απαιτούμενες συνθήκες παροχής καυσίμου – αέρα.
8. Έναρξη μετρήσεων. Μετατόπιση του πυρομέτρου με τη βοήθεια του εργαλειοφορείου. Το μέγεθος της μετατόπισης καθορίζεται από βαθμονόμηση που υπάρχει στο εργαλειοφορείο και στην παράλληλη και στην κάθετη διεύθυνση του πυρομέτρου.
9. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων σβήνουμε παροχή καυσίμου και εν συνεχεία παροχή αέρα.
10. Αφού έχει σβήσει η φλόγα ελέγχουμε για τυχόν μετατόπιση του καυστήρα, του πυρομέτρου και του εργαλειοφορείου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (επανάληψη βημάτων 2, 3, 4).

Κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων έχουμε κρατήσει σταθερή την παροχή καυσίμου στα $0,95 \text{ m}^3/\text{h}$ και την παροχή αέρα στα $11 \text{ m}^3/\text{h}$ εκτός από ένα στο οποίο η παροχή καυσίμου είναι $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ και η παροχή αέρα

13 m³/h για να διαπιστώσουμε την επίδραση της μεταβολής των παροχών στο προφίλ της θερμοκρασίας. Υπάρχουν προφίλ κάθετα και παράλληλα στη διεύθυνση του πυρομέτρου, όπως και πειράματα με διαφορετικό αλφάδιασμα καυστήρα και φυσικά υπάρχουν προφίλ σε διάφορα ύψη. Όλα αυτά εξηγούνται πιο κάτω αναλυτικότερα.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 1

Ύψος πυρομέτρου: 5cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 23 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 35 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	128	128	128	129	155	900	1160	1165
Χρόνος (sec)	30	30	30	15	130	130	120	75

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1080	1100	440	180	165	161	155
Χρόνος (sec)	60	60	120	230	100	50	50

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 2

Ύψος πυρομέτρου: 15cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 36 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 41 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	157	170	260	450	670	870	980	945
Χρόνος (sec)	30	35	90	110	60	60	70	40

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	965	1010	840	565	420	205	180
Χρόνος (sec)	40	70	70	70	50	260	120

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 3

Ύψος πυρομέτρου: 20cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 42 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 46 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	175	205	295	510	700	830	890	865
Χρόνος (sec)	30	60	60	100	90	90	50	50

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	840	825	680	500	360	230	185
Χρόνος (sec)	45	180	200	120	120	126	110

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 4

Ύψος πυρομέτρου: 25cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 46 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 48 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	208	235	380	513	650	722	730	705
Χρόνος (sec)	60	60	150	140	160	120	60	60

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	658	657	580	540	425	285	200
Χρόνος (sec)	70	100	120	60	90	120	140

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 5

Ύψος πυρομέτρου: 30 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 48 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 49 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	210	240	410	510	584	635	650	630
Χρόνος (sec)	100	90	90	120	60	60	50	40

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	570	520	482	458	386	260	200
Χρόνος (sec)	60	60	60	50	60	110	100

Ομάδα πειραμάτων: πρώτη

Πείραμα 6

Ύψος πυρομέτρου: 10 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 50 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 51 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	147	149	157	195	450	910	1040	980
Χρόνος (sec)	60	30	50	40	60	120	70	50

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1048	990	680	410	270	190	170
Χρόνος (sec)	90	90	90	90	120	120	120

Ομάδα πειραμάτων: δεύτερη

Πείραμα 1

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα σε διεύθυνση κάθετη σ' αυτή του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 20 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 30 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	160	245	490	655	790	895	940	870
Χρόνος (sec)	30	90	170	180	200	180	130	130

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	860	880	755	545	320	220	180
Χρόνος (sec)	90	70	120	150	180	180	150

Ομάδα πειραμάτων: δεύτερη

Πείραμα 2

Ύψος πυρομέτρου: 10 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 31 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 38 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	150	150	160	200	435	970	1180	1130
Χρόνος (sec)	30	30	30	100	200	300	280	170

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1200	1180	930	485	265	205	170
Χρόνος (sec)	200	150	210	250	230	150	180

Ομάδα πειραμάτων: δεύτερη

Πείραμα 3

Ύψος πυρομέτρων: 10 και 20 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 35 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 39 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	143	195	370	590	850
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	135	137	145	265	1100
Χρόνος (sec)	30	100	180	200	250

- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	790	836	690	404	185
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	1130	1175	920	260	160
Χρόνος (sec)	120	140	200	320	230

Ομάδα πειραμάτων: τρίτη

Πείραμα 4

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 42 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 45 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	157	182	312	472	665	820	870	860
Χρόνος (sec)	60	60	120	60	90	80	60	70

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	815	850	810	650	434	260	196
Χρόνος (sec)	60	60	90	60	150	120	150

Ομάδα πειραμάτων: τρίτη

Πείραμα 5

Ύψος πυρομέτρου: 10 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 43 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 46 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	147	152	159	193	440	820	1090	1100
Χρόνος (sec)	60	60	60	70	120	120	80	60

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1115	1093	930	480	237	190	175
Χρόνος (sec)	60	80	90	120	120	90	90

Ομάδα πειραμάτων: τρίτη

Πείραμα 6

Ύψος πυρομέτρων: 10 και 20 cm

Προφίλ κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 45 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 50 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	170	182	270	630	1010
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	156	158	167	300	985
Χρόνος (sec)	60	60	60	120	130

- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	980	945	850	425	245
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	1050	1060	862	245	185
Χρόνος (sec)	90	90	100	180	150

Ομάδα πειραμάτων: τέταρτη

Πείραμα 1

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα σε διεύθυνση κάθετη σ' αυτή του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 19 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 33 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	124	126	140	195	330	465	624	830
Χρόνος (sec)	40	30	40	210	310	250	135	140

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	934	920	825	640	478	366	260
Χρόνος (sec)	100	60	60	100	90	110	180

Ομάδα πειραμάτων: τέταρτη

Πείραμα 2

Ύψος πυρομέτρου: 10 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 30 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 37 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	130	132	135	145	215	620	1050	1150
Χρόνος (sec)	30	30	60	80	150	300	340	150

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1200	1130	900	575	420	277	227
Χρόνος (sec)	160	160	190	300	200	180	180

Ομάδα πειραμάτων: τέταρτη

Πείραμα 3

Ύψος πυρομέτρων: 10 και 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα σε διεύθυνση κάθετη σ' αυτή του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 32 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 37 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	127	127	128	155	975
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	132	135	150	220	523
Χρόνος (sec)	30	30	70	150	250

- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	1170	1245	1000	505	295
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	756	910	780	480	295
Χρόνος (sec)	240	280	250	240	230

Ομάδα πειραμάτων: πέμπτη

Πείραμα 1

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 24 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 38 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	123	130	170	247	384	550	760	920
Χρόνος (sec)	60	90	150	150	120	90	90	60

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	995	950	755	585	420	300	250
Χρόνος (sec)	90	60	150	90	150	120	90

Ομάδα πειραμάτων: πέμπτη

Πείραμα 2

Ύψος πυρομέτρου: 10 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 38 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 43 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων								
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5
Θερμοκρασία (°C)	142	144	147	164	315	850	1065	1075
Χρόνος (sec)	60	60	60	60	120	120	60	80

- συνέχεια -							
Απόσταση (cm)	12	13,5	15	16,5	18	19,5	21
Θερμοκρασία (°C)	1100	1092	945	647	424	300	260
Χρόνος (sec)	60	60	90	120	140	120	120

Ομάδα πειραμάτων: πέμπτη

Πείραμα 3

Ύψος πυρομέτρων: 10 και 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 43 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 46 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	160	165	190	320	605
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	170	170	170	213	920
Χρόνος (sec)	120	100	90	140	120

- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία πάνω πυρομέτρου (°C)	940	1060	850	470	315
Θερμοκρασία κάτω πυρομέτρου (°C)	1100	1107	920	420	275
Χρόνος (sec)	90	80	180	180	180

Ομάδα πειραμάτων: έκτη

Πείραμα 1

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 11 m³/h

Παροχή καυσίμου: 0,95 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 23 °C

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 32 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία (°C)	120	126	151	283	495
Χρόνος (sec)	60	80	100	120	150

- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία (°C)	715	920	800	462	300
Χρόνος (sec)	180	170	100	120	90

Ομάδα πειραμάτων: έκτη

Πείραμα 2

Ύψος πυρομέτρου: 20 cm

Προφίλ παράλληλο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Αλφάδιασμα καυστήρα κάθετο στη διεύθυνση του πυρομέτρου.

Παροχή αέρα: 13 m³/h

Παροχή καυσίμου: 1,1 m³/h

Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη: 32 °C

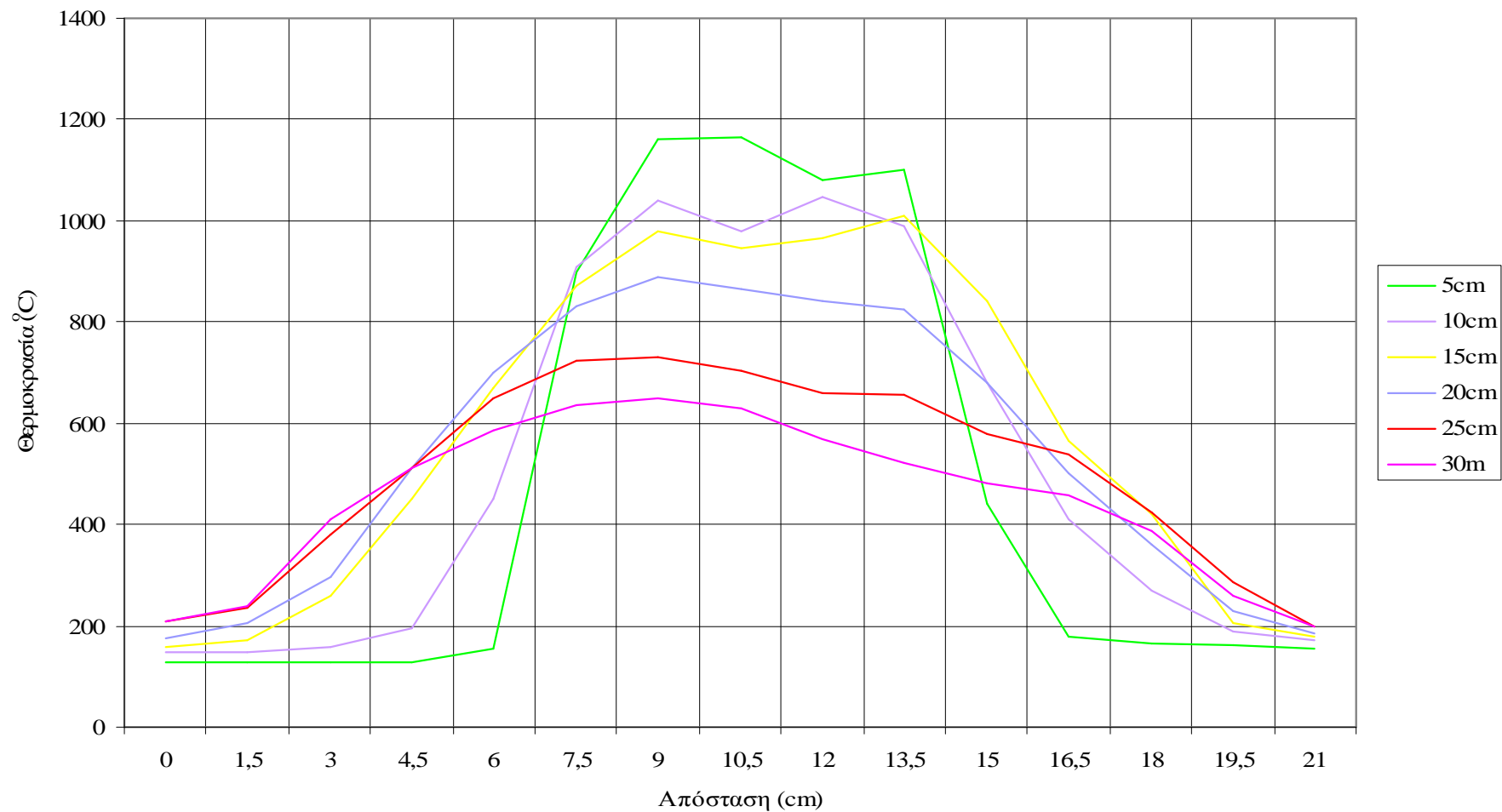
Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη λήξη: 35 °C

Αποτελέσματα μετρήσεων					
Απόσταση (cm)	0	1,5	3	5	8
Θερμοκρασία (°C)	170	175	186	240	430
Χρόνος (sec)	70	80	80	160	180

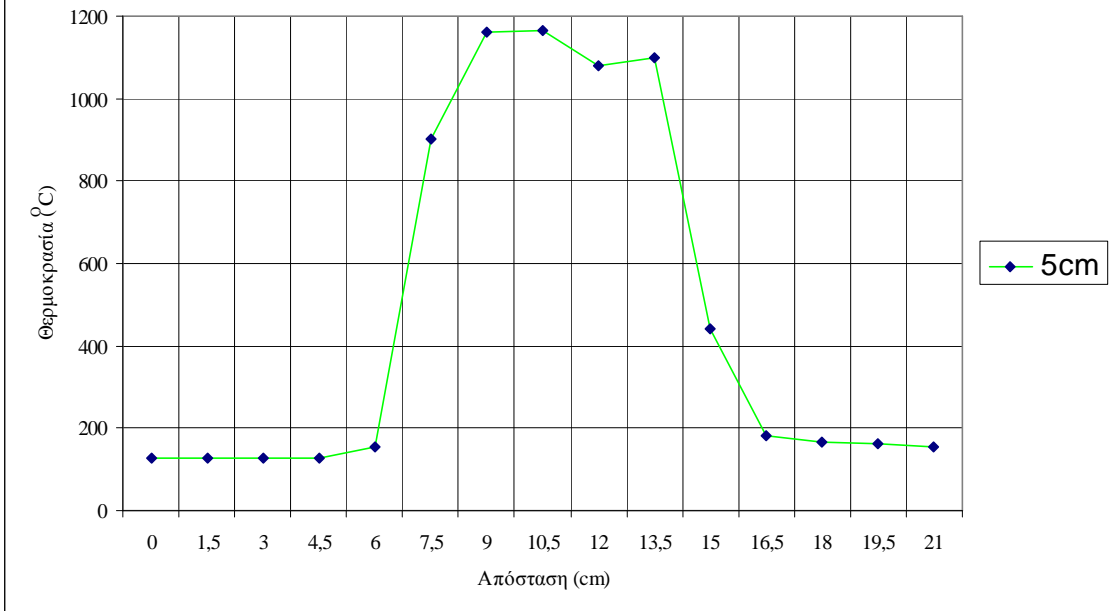
- συνέχεια -					
Απόσταση (cm)	10	13	15	18	20
Θερμοκρασία (°C)	693	860	740	450	350
Χρόνος (sec)	200	180	150	150	120

5.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

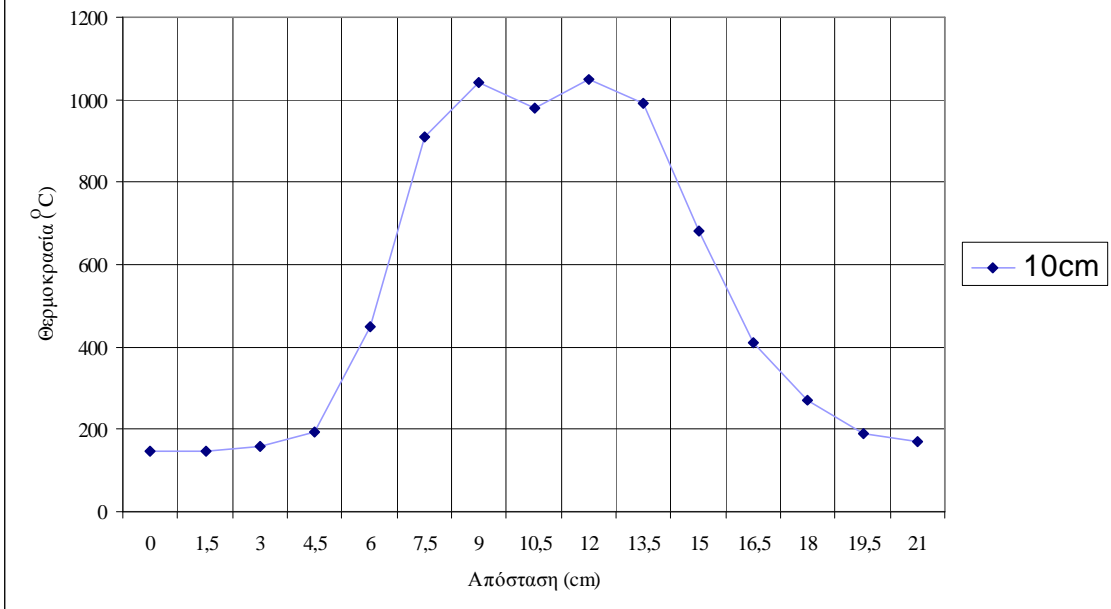
Κάθετα προφίλ στα 5,10,15,20,25,30 cm,πρώτη ομάδα πειραμάτων



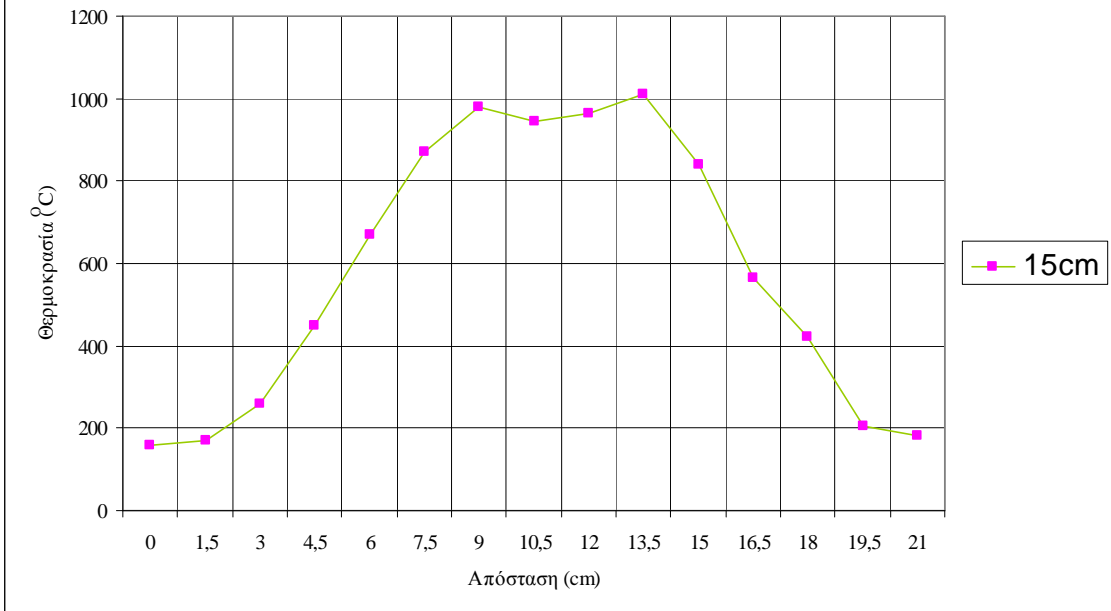
Ύψος πυρομέτρου 5 cm, προφίλ. κάθετο.
Ημ. δεξ. 16-3-2005, πείραμα 1



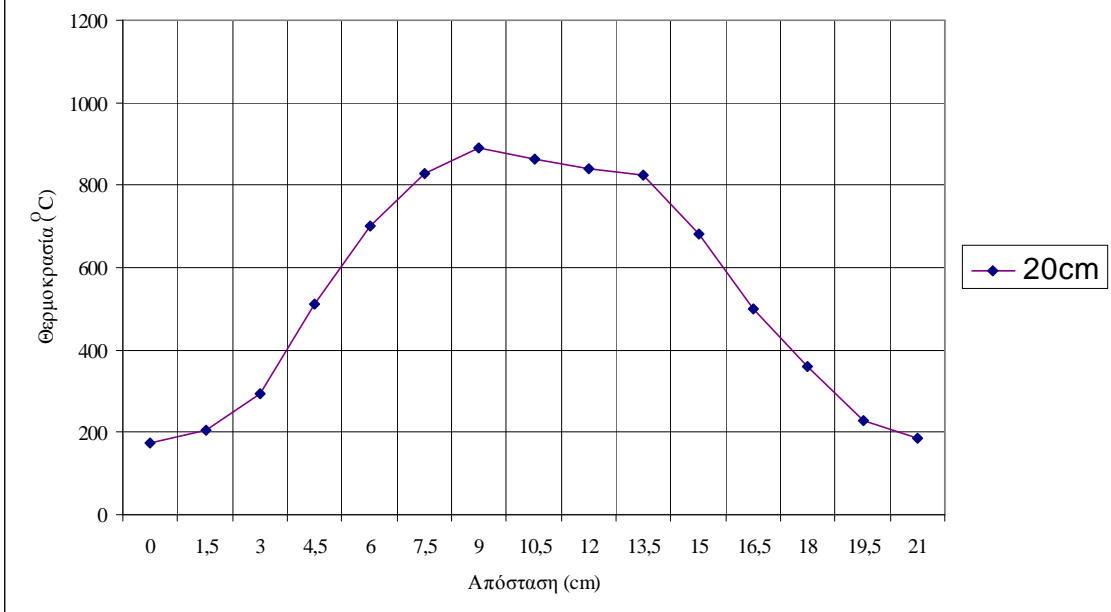
Ύψος πυρομέτρου 10 cm, προφίλ. κάθετο.
Ημ. δεξ. 16-3-2005, πείραμα 6



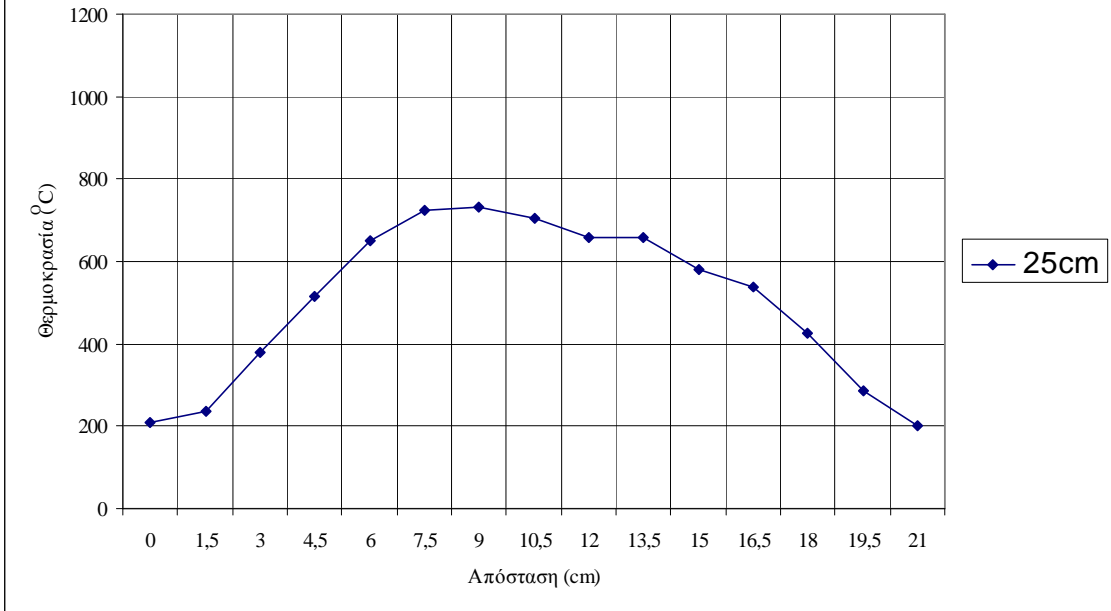
Ύψος πυρομέτρου 15 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ δαξ. 16-3-2005, πείραμα 2



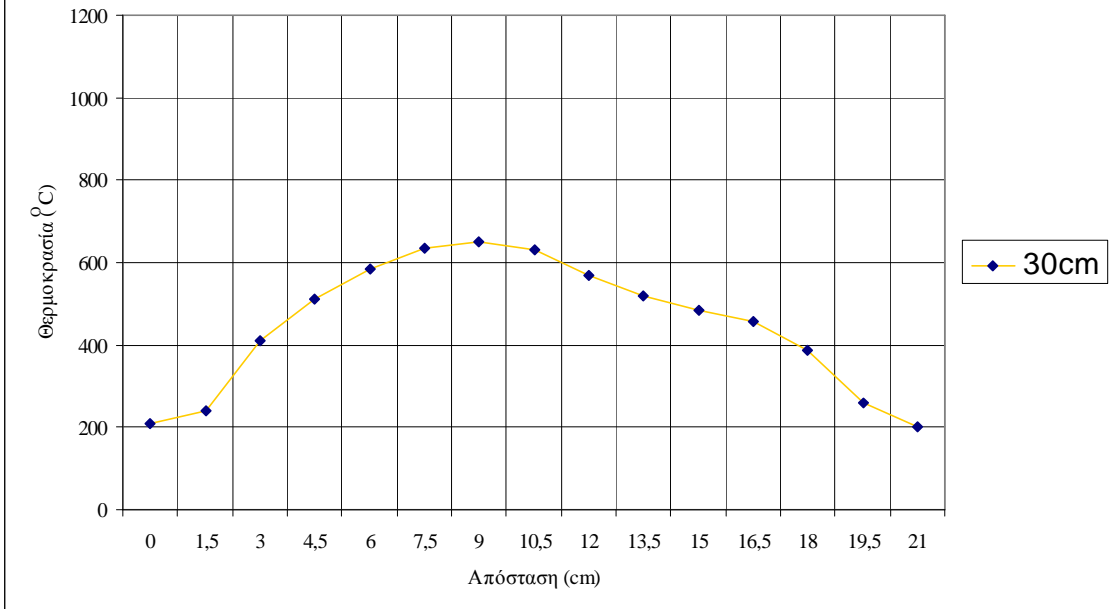
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ δαξ. 16-3-2005, πείραμα 3



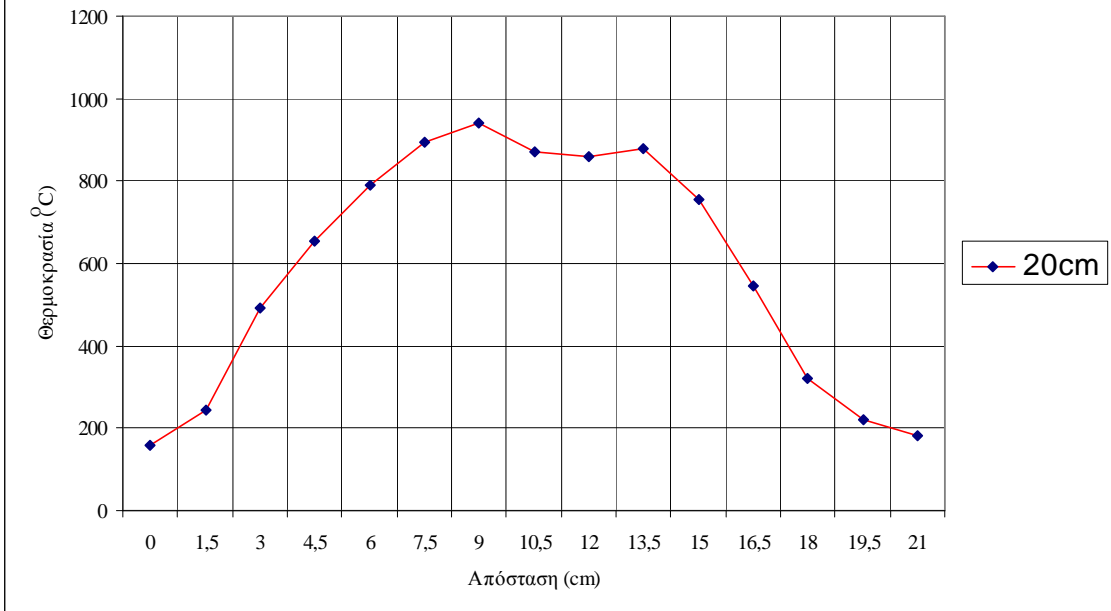
Ύψος πυρομέτρου 25 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ δαξ. 16-3-2005, πείραμα 4



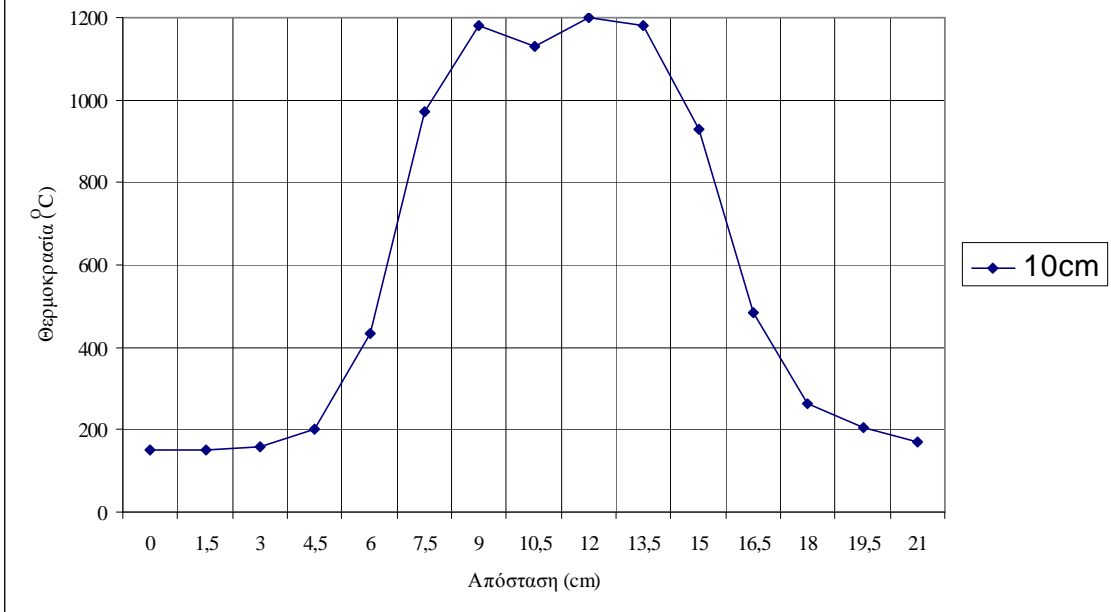
Ύψος πυρομέτρου 30 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ δαξ. 16-3-2005, πείραμα 5



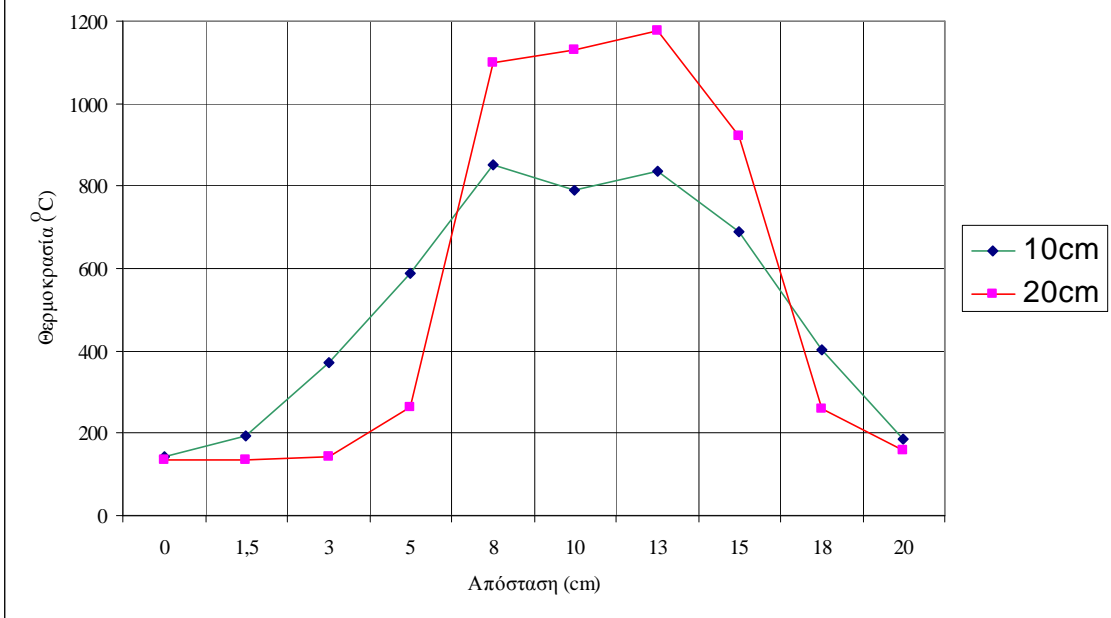
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ. κάθετο.
Ημ διεξ. 6-3-2005, πείραμα 1



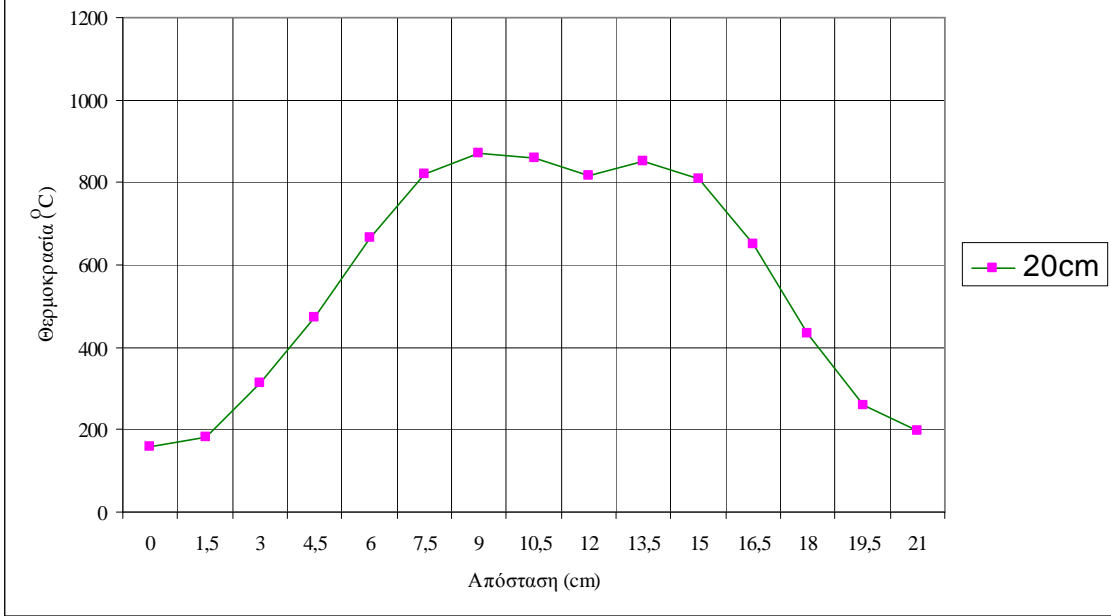
Ύψος πυρομέτρου 10 cm, προφίλ. κάθετο.
Ημ διεξ. 6-3-2005, πείραμα 2



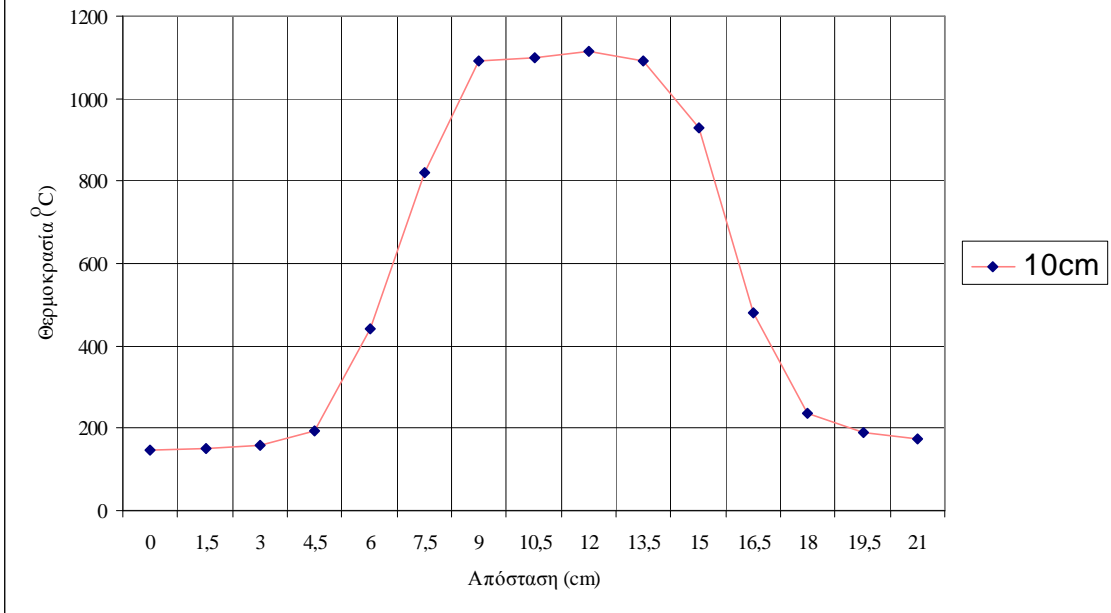
Ύψος πυρομέτρων 10 και 20 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ διεξ. 6-3-2005, πείραμα 3 πράσινο: 10cm, κόκκινο: 20cm



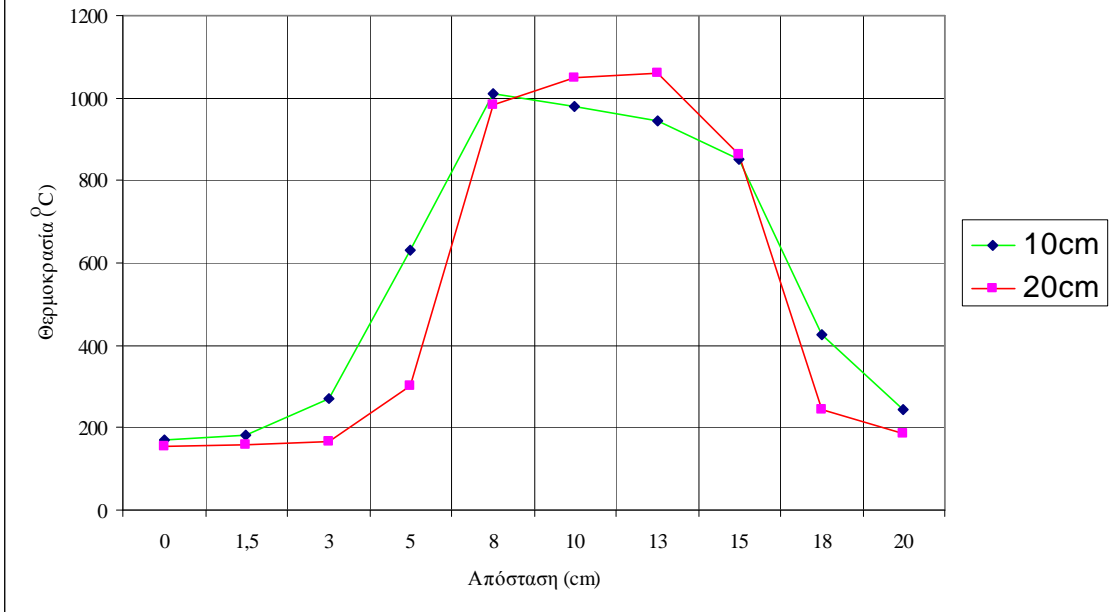
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 4



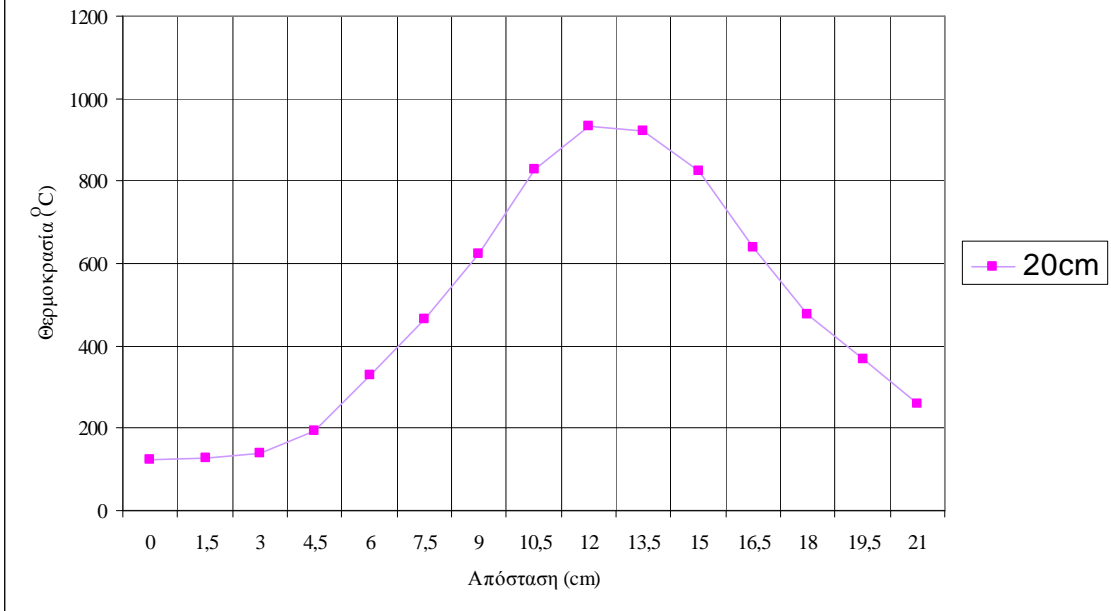
Ύψος πυρομέτρου 10 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 5



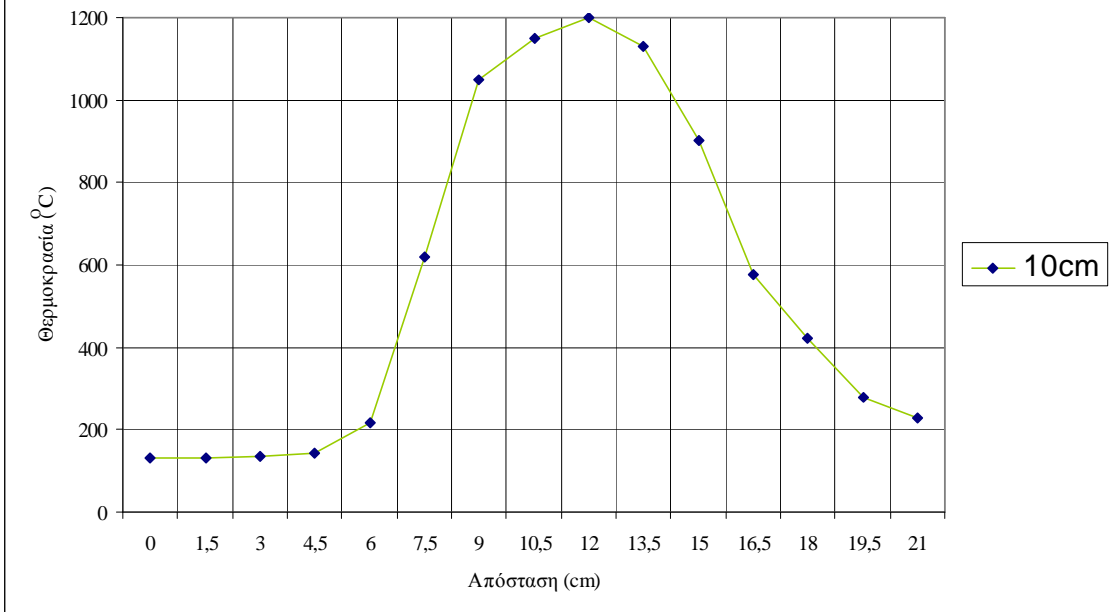
Ύψος πυρομέτρων 10 και 20 cm, προφίλ κάθετο.
Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 6 κόκκινο: 20 cm, πράσινο: 10 cm



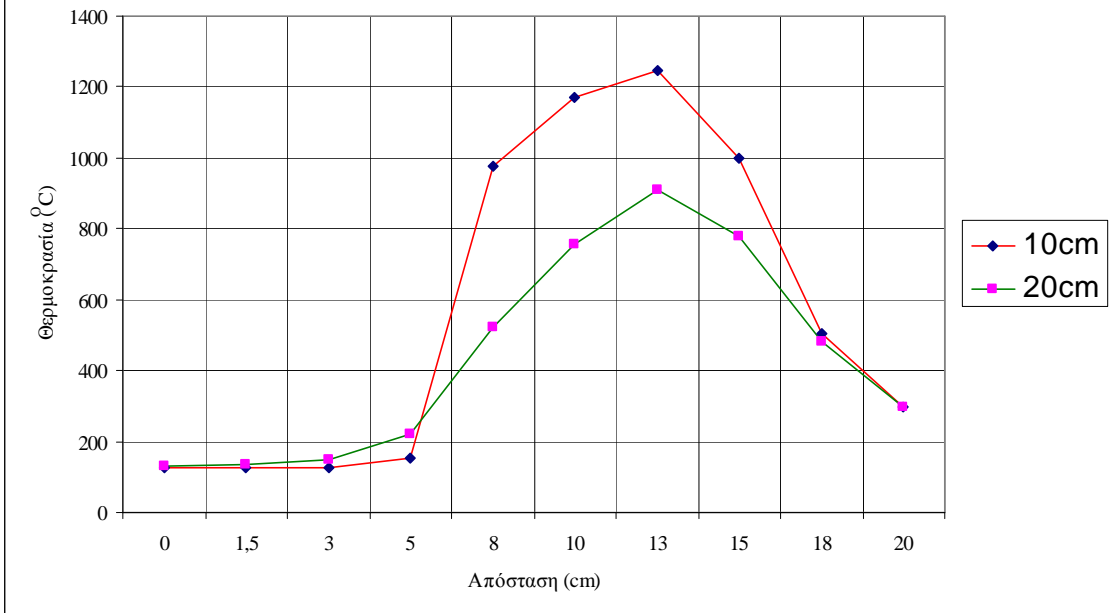
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφύλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 3-3-2005, πείραμα 1



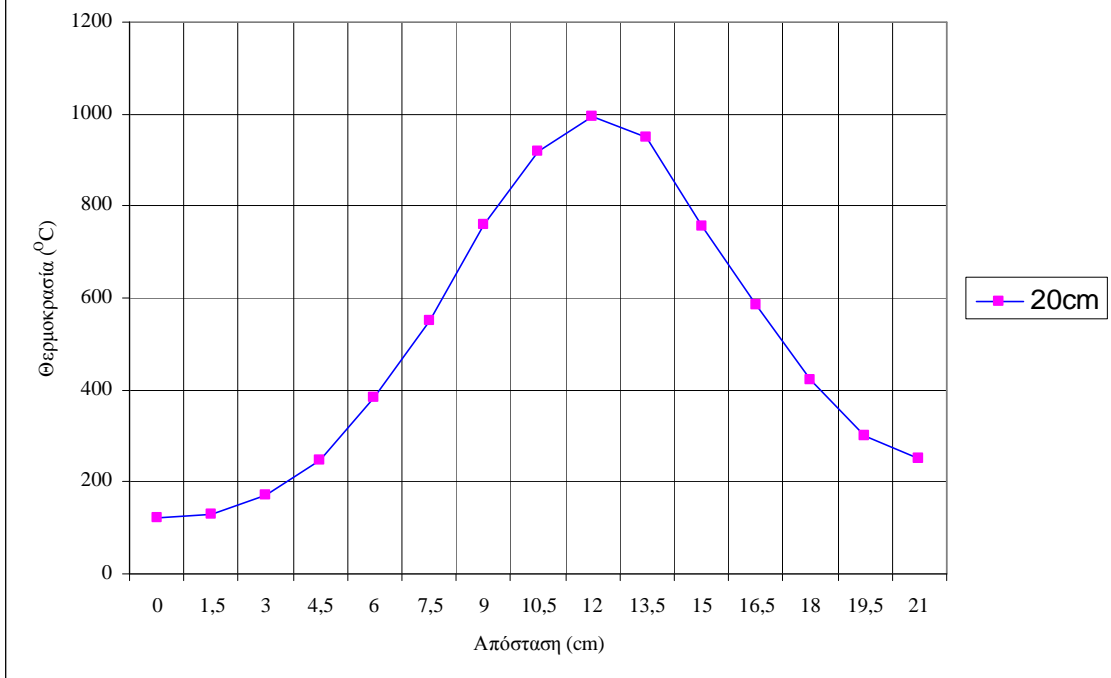
Ύψος πυρομέτρου 10 cm, προφύλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 3-3-2005, πείραμα 2



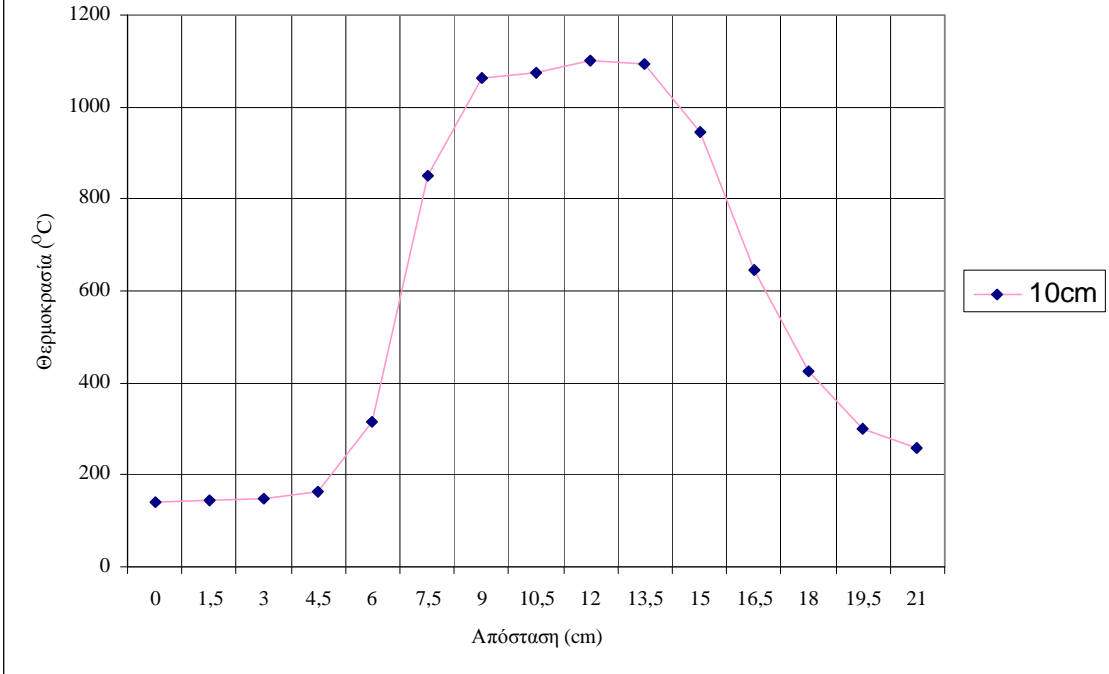
Ύψος πυρομέτρων 10 και 20 cm, προφίλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 3-3-2005, πείραμα 3 κόκκινο: 10cm, πράσινο: 20 cm



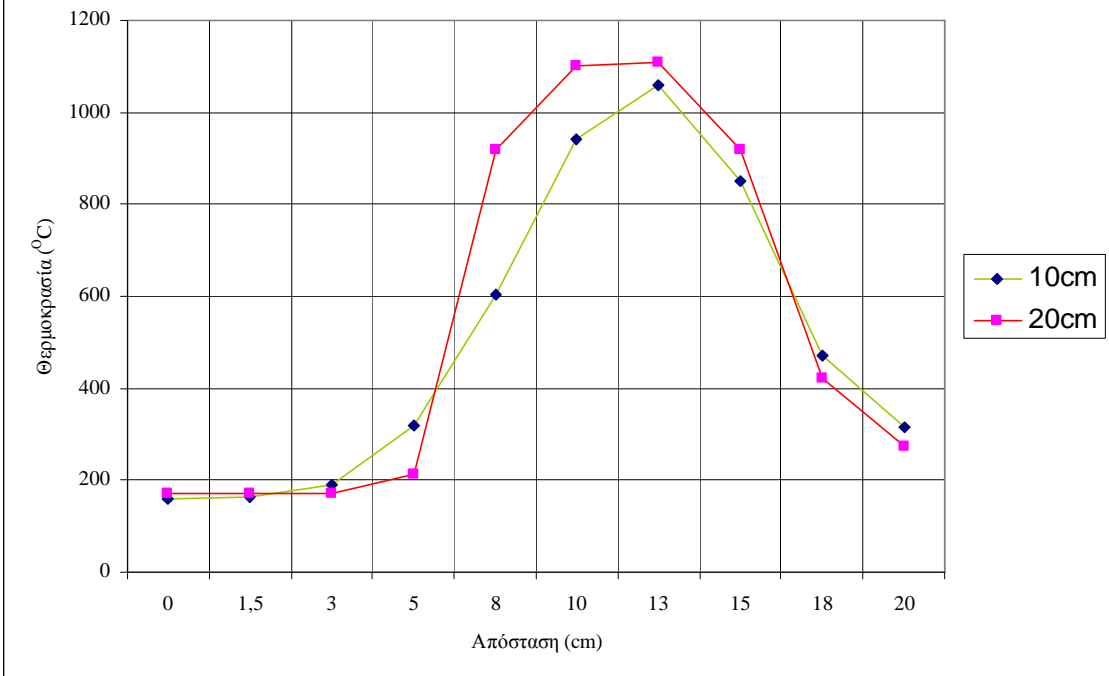
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 1



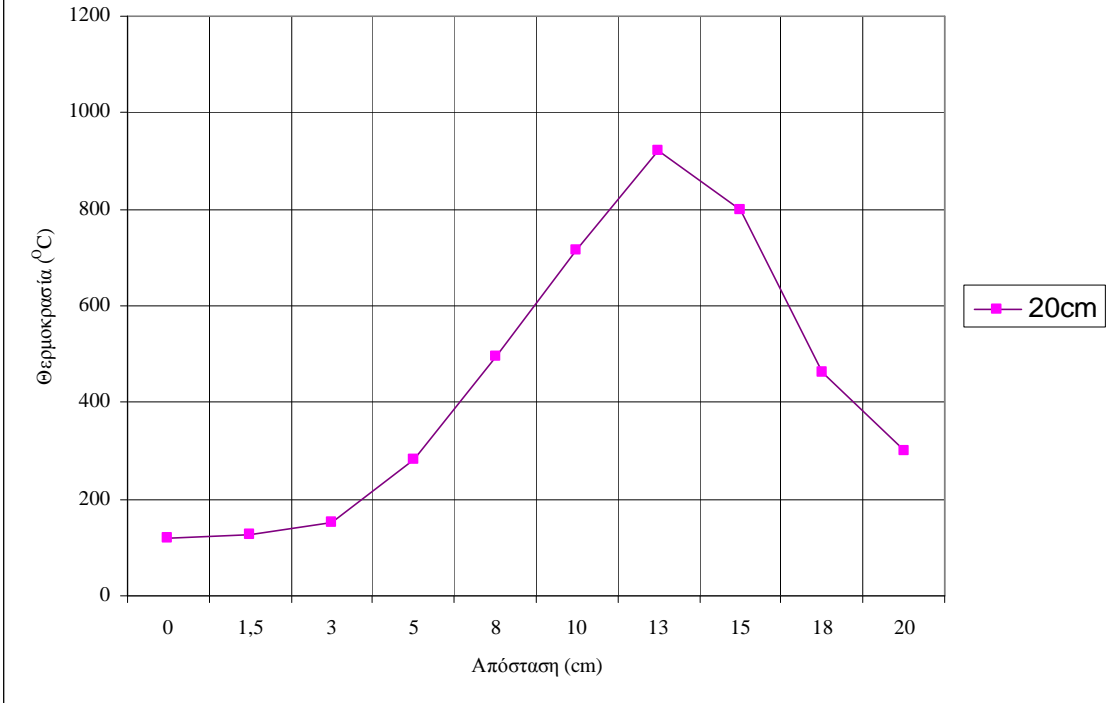
Υψος πυρομέτρου 10 cm, προφίλ παράλληλο.
 Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 2



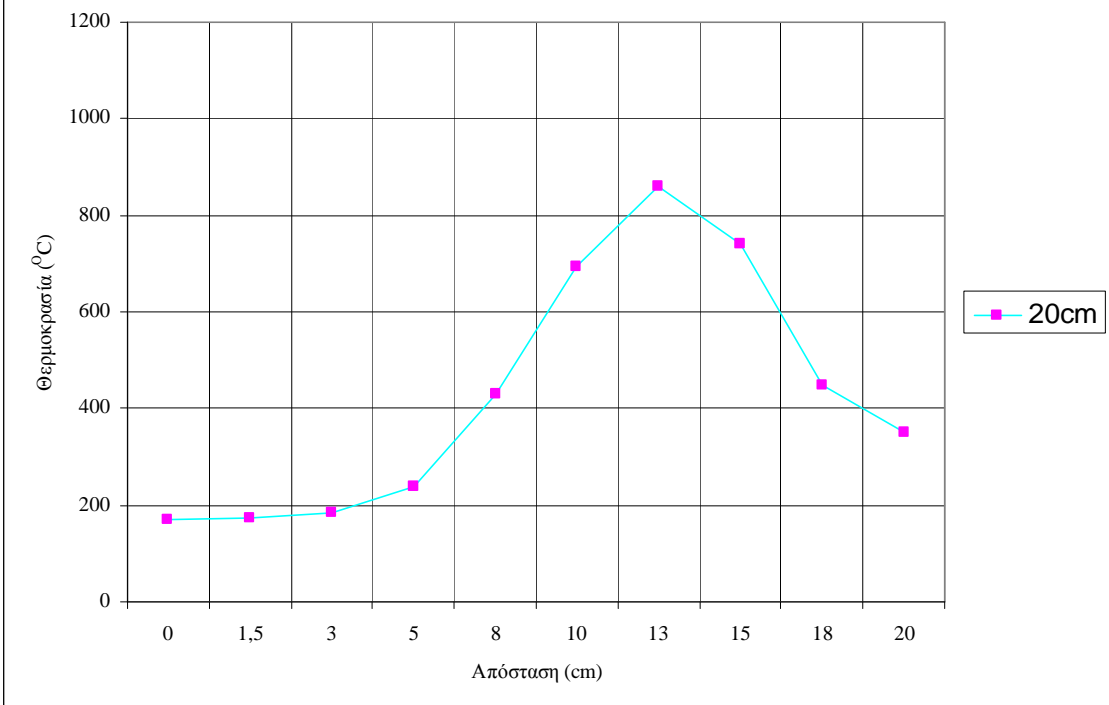
Υψος πυρομέτρων 10 και 20 cm, προφίλ παράλληλο.
 Ημ διεξ. 10-3-2005, πείραμα 3 πράσινο: 10 cm, κόκκινο: 20cm



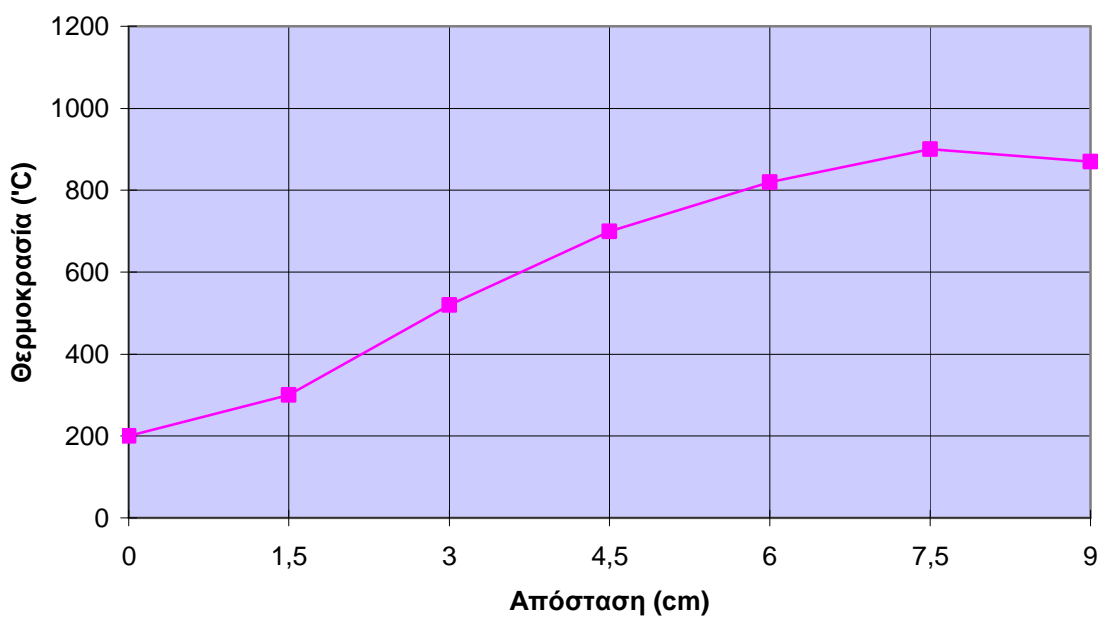
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 31-3-2005, πείραμα 1



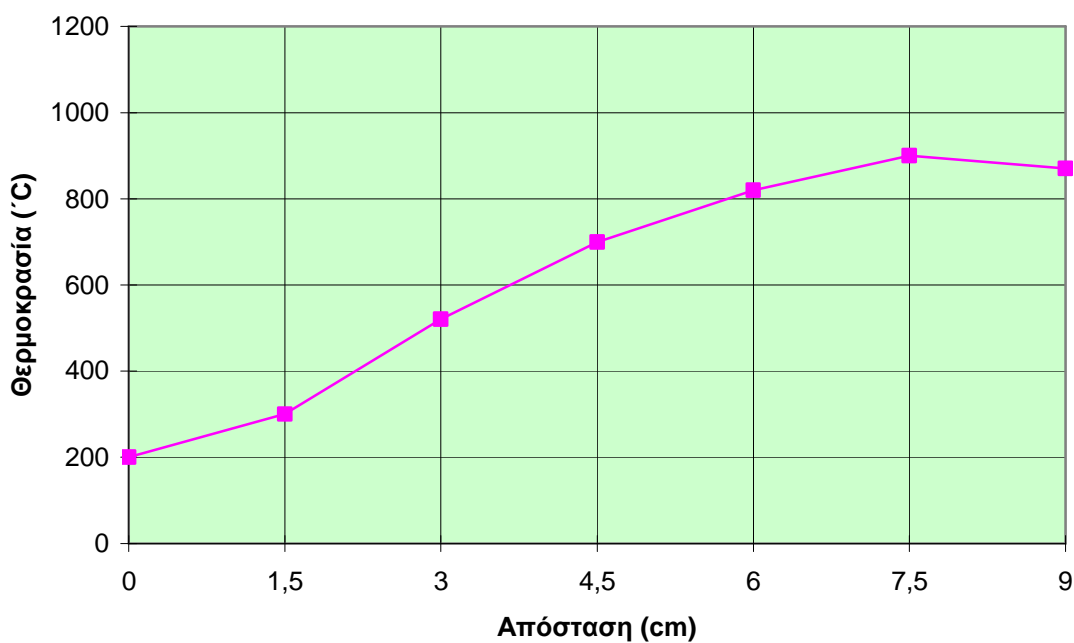
Ύψος πυρομέτρου 20 cm, προφίλ παράλληλο.
Ημ διεξ. 31-3-2005, πείραμα 2



Ύψος πυρομέτρου 20cm, προφίλ κάθετο Διάγραμμα μέσω τιμών θερμοκρασίας υπολογισμένων μέσω software



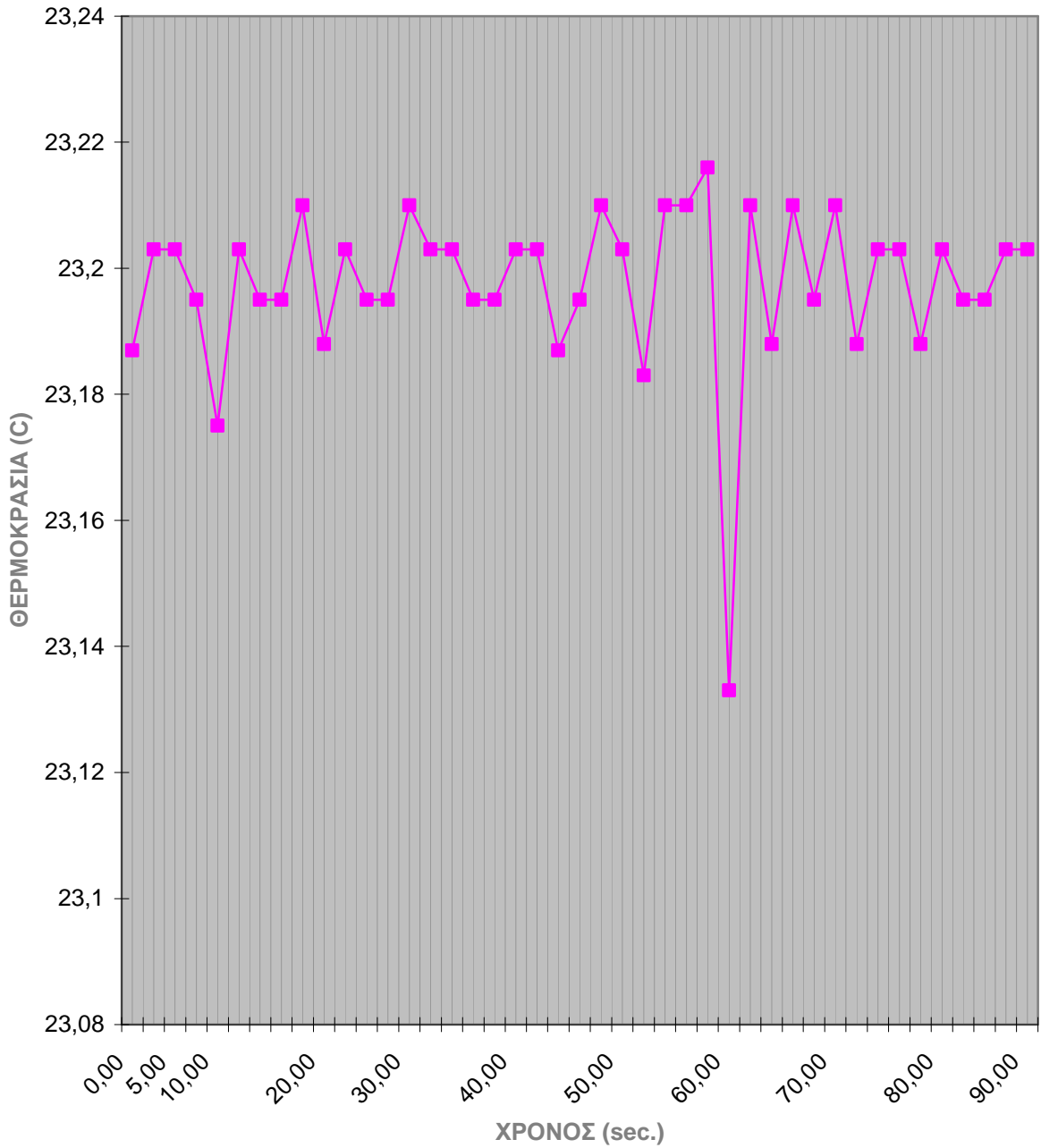
Ύψος πυρομέτρου 20cm προφίλ κάθετο Απ'ευθείας ανάγνωση των ενδείξεων των πυρομέτρων



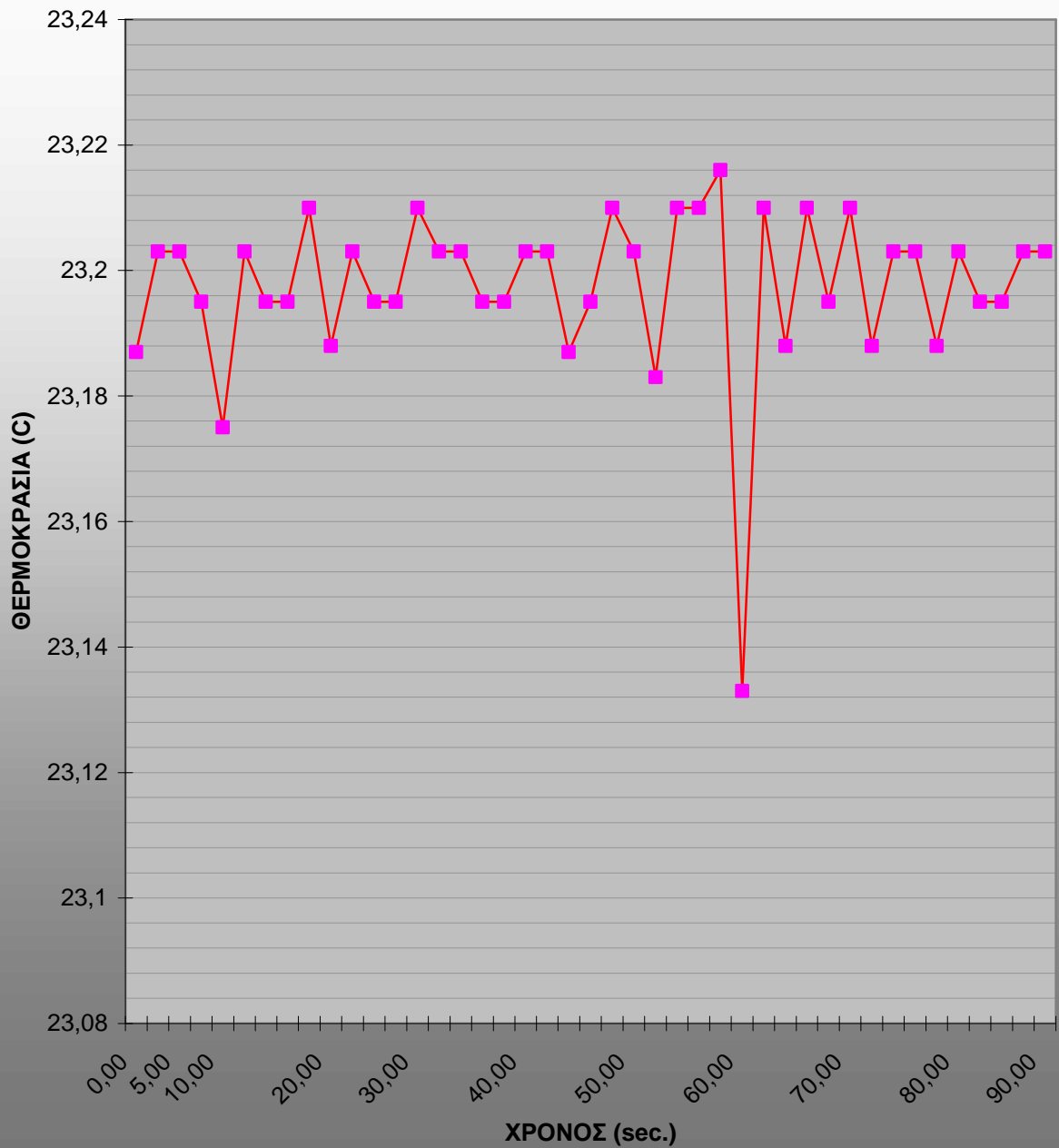
5.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

ΜΕΣΩ SOFTWARE

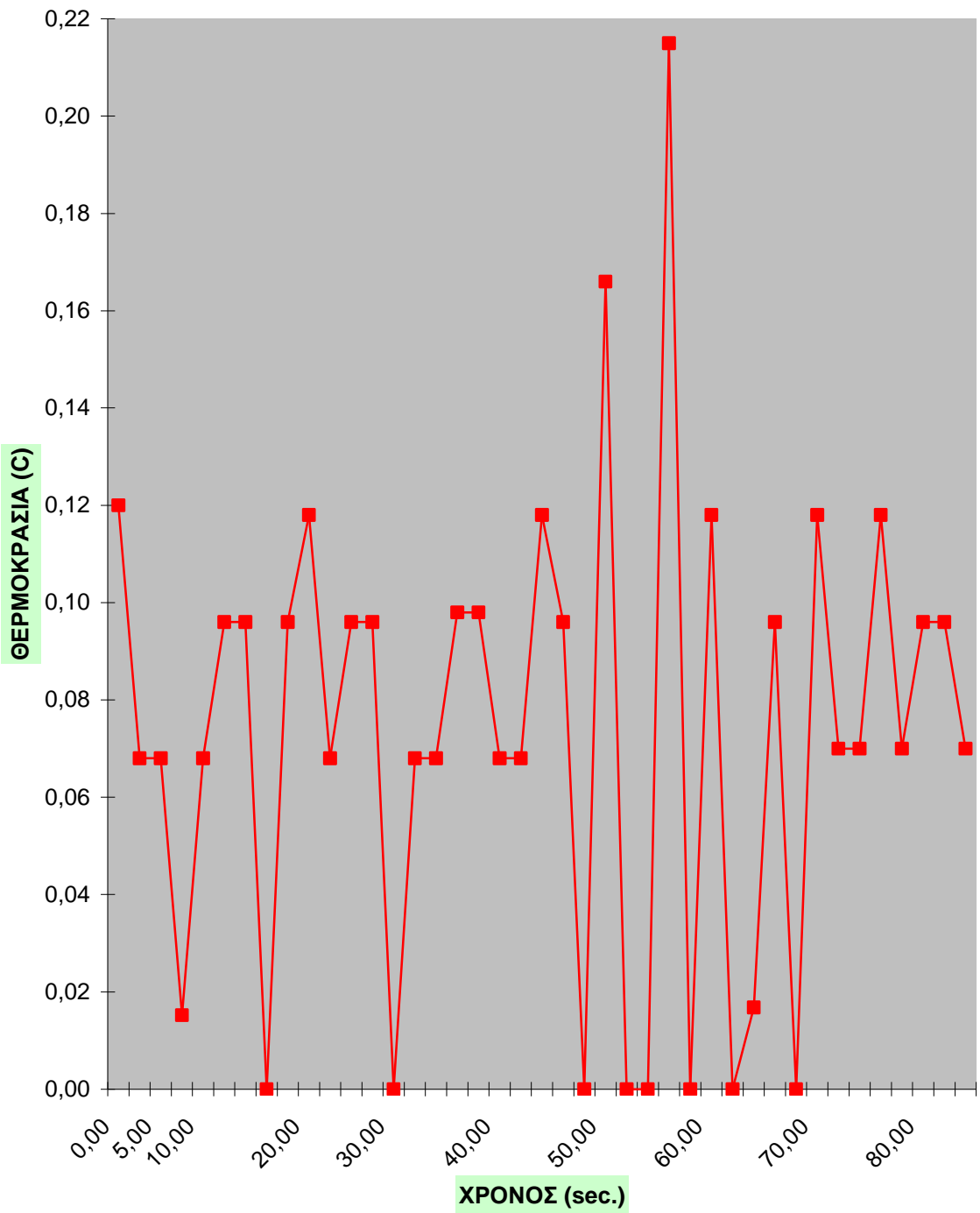
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ), ΚΑΝΑΛΙ 0
ΘΕΣΗ ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 0 cm



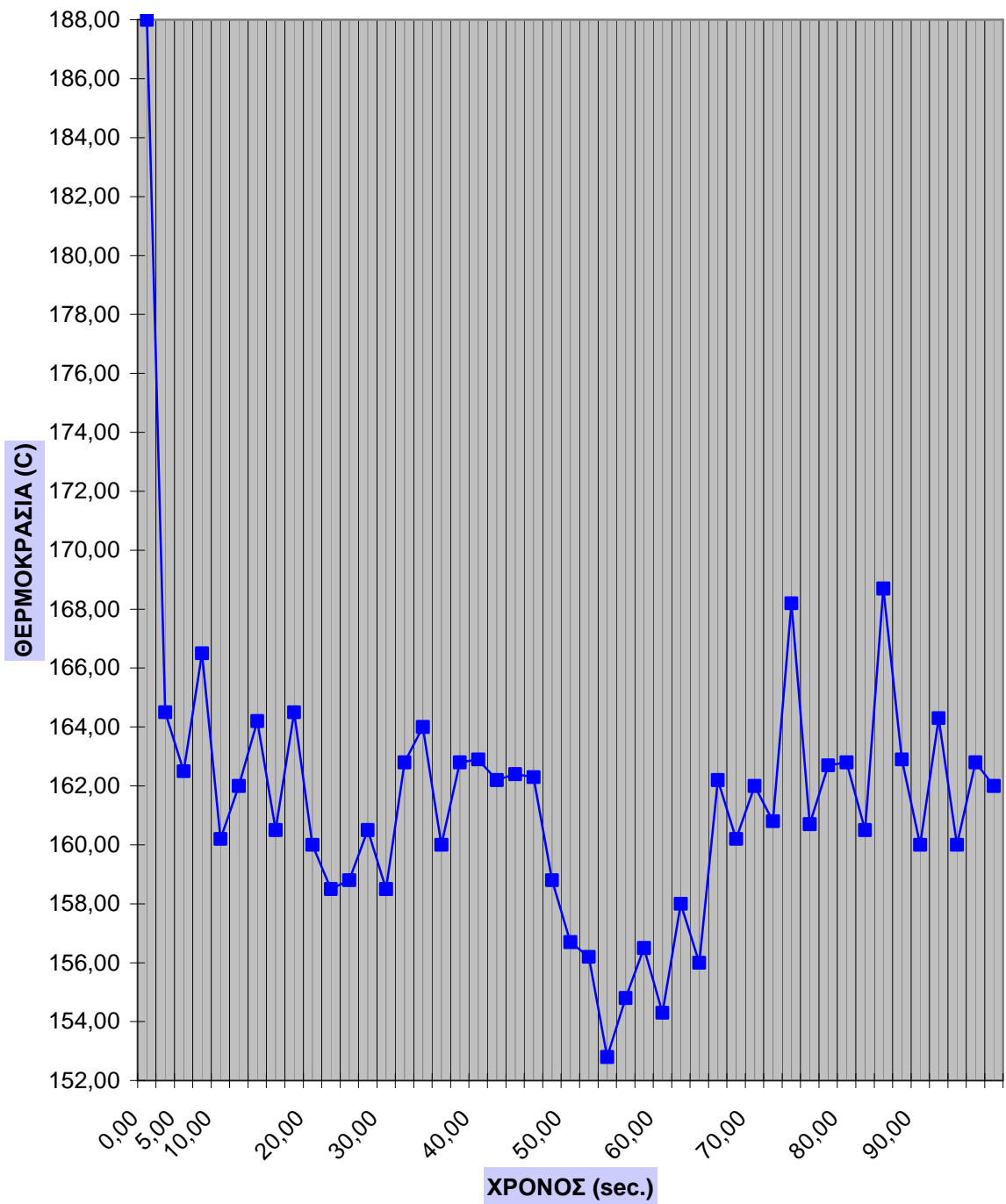
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΤΙΜΗ RMS, ΚΑΝΑΛΙ 0 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 0 cm



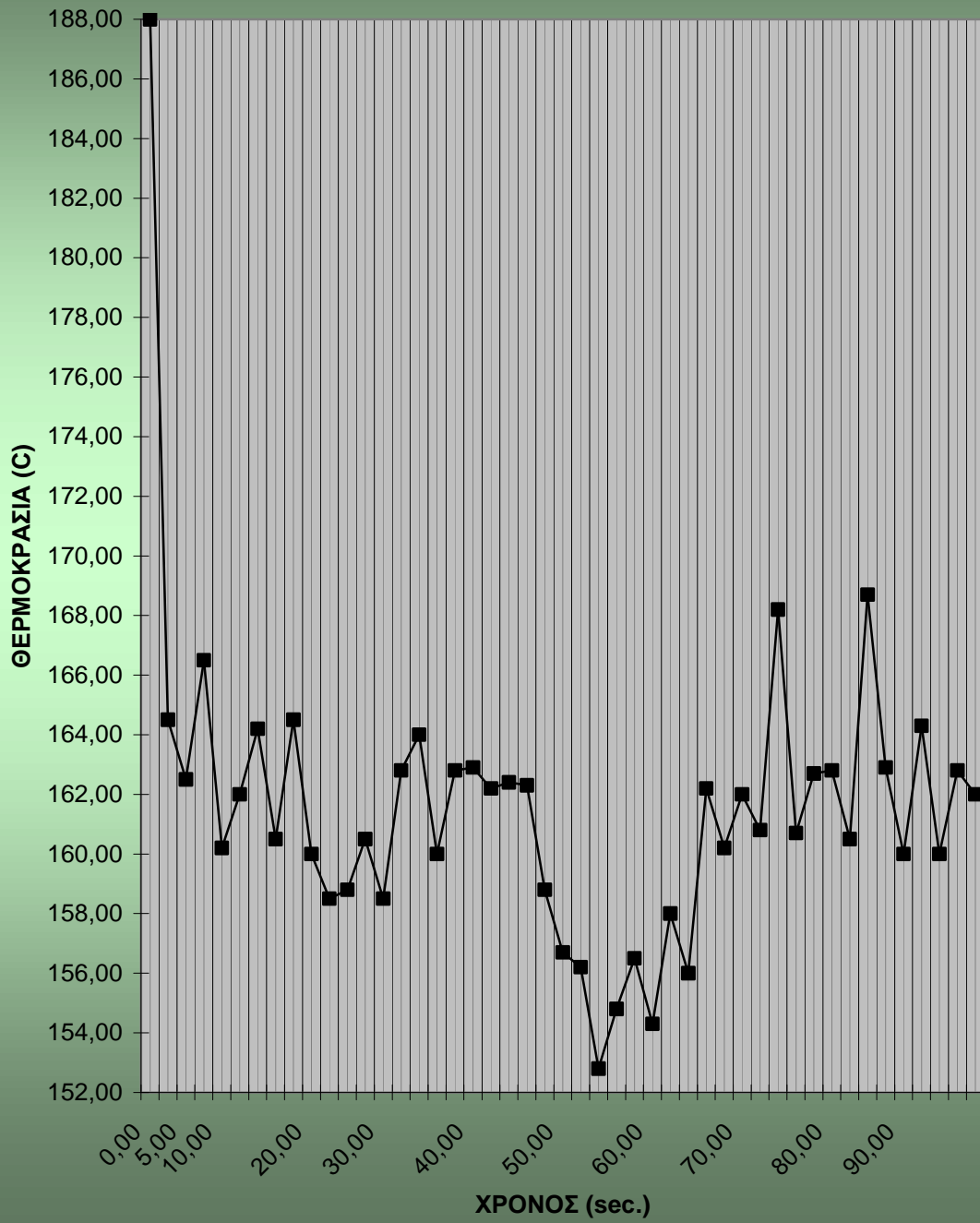
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
(σχ), ΚΑΝΑΛΙ 0 ΘΕΣΗ ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 0 cm**



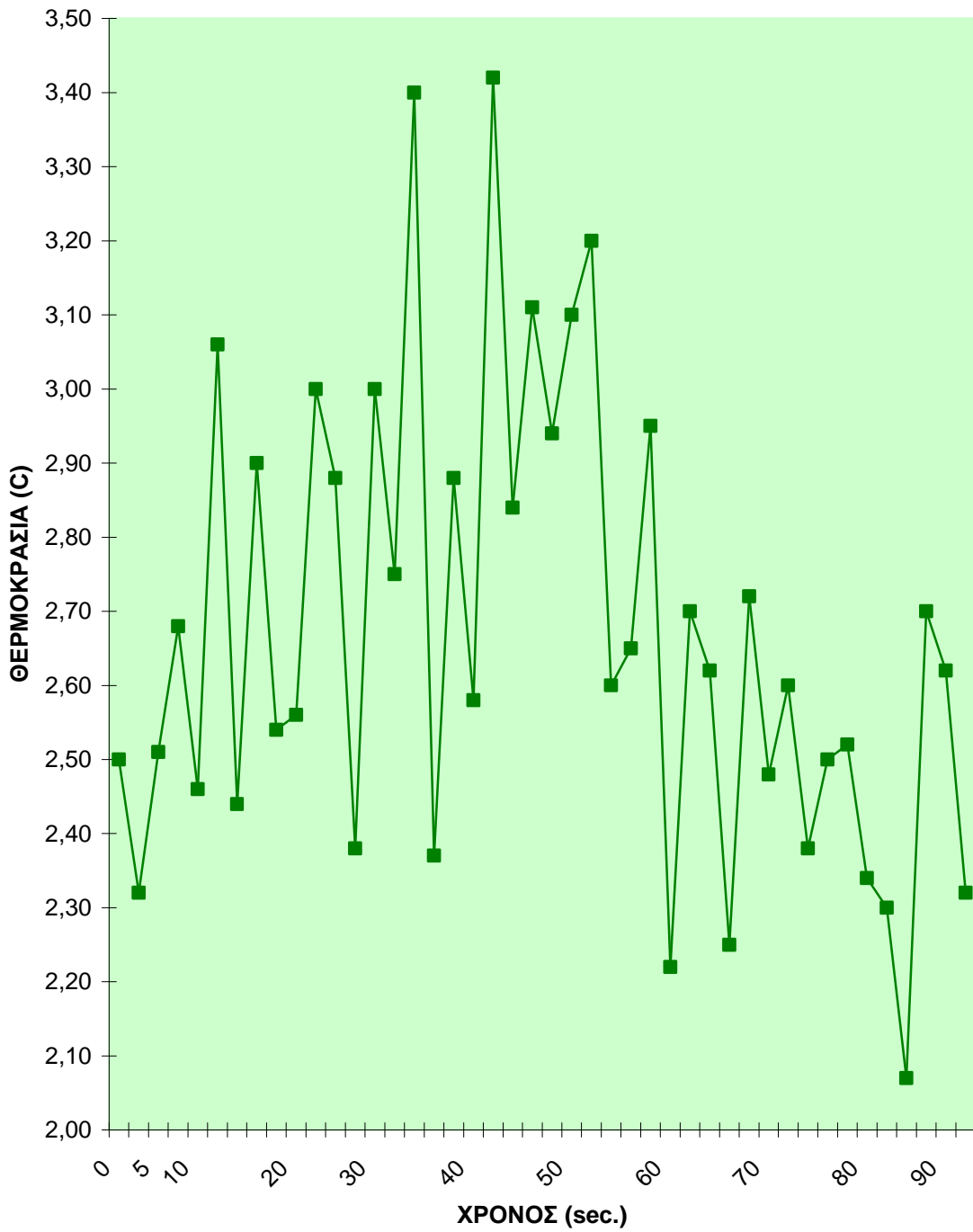
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ,ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ),ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ:0 cm**



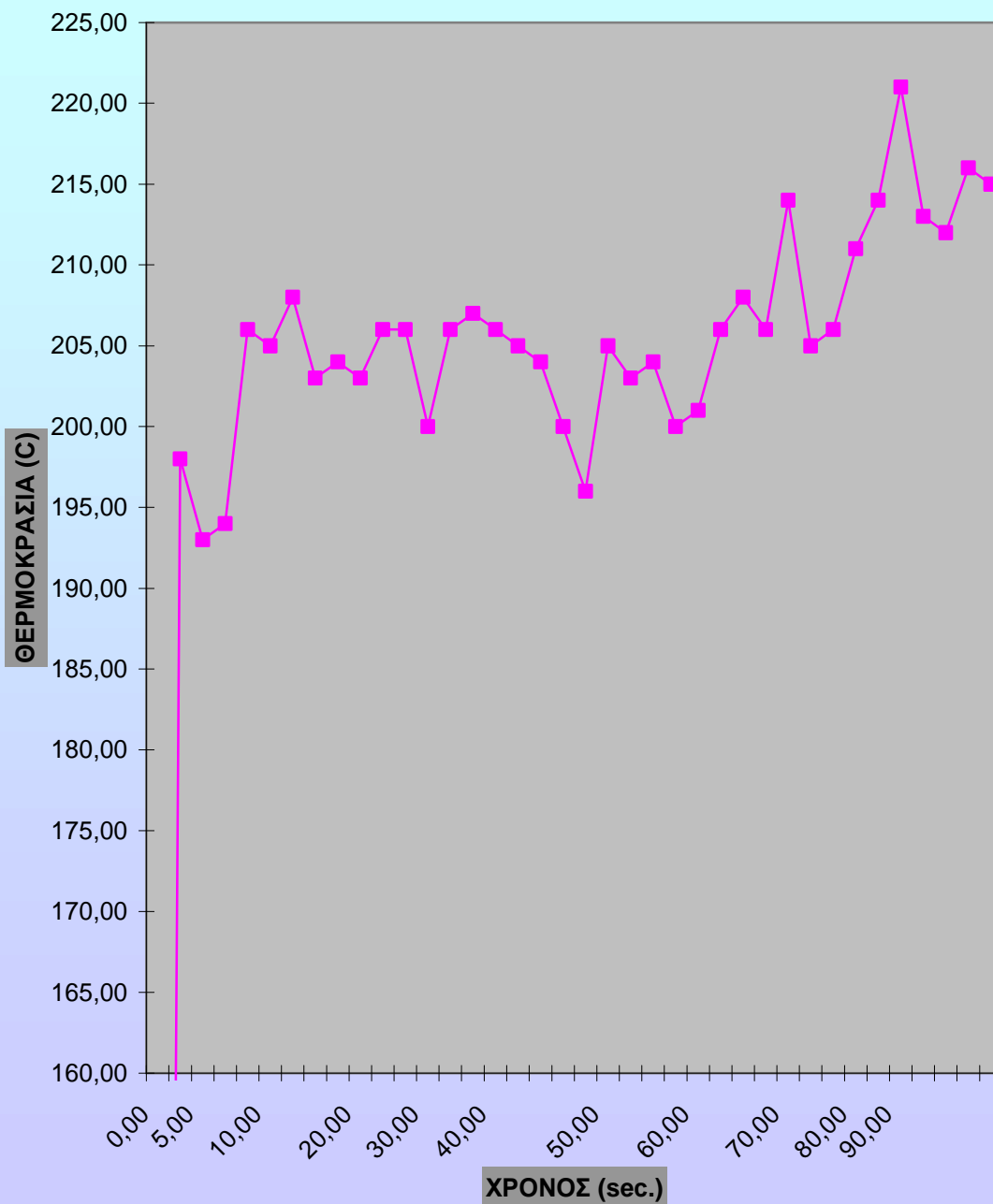
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ, ΤΙΜΗ RMS, ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 0 cm**



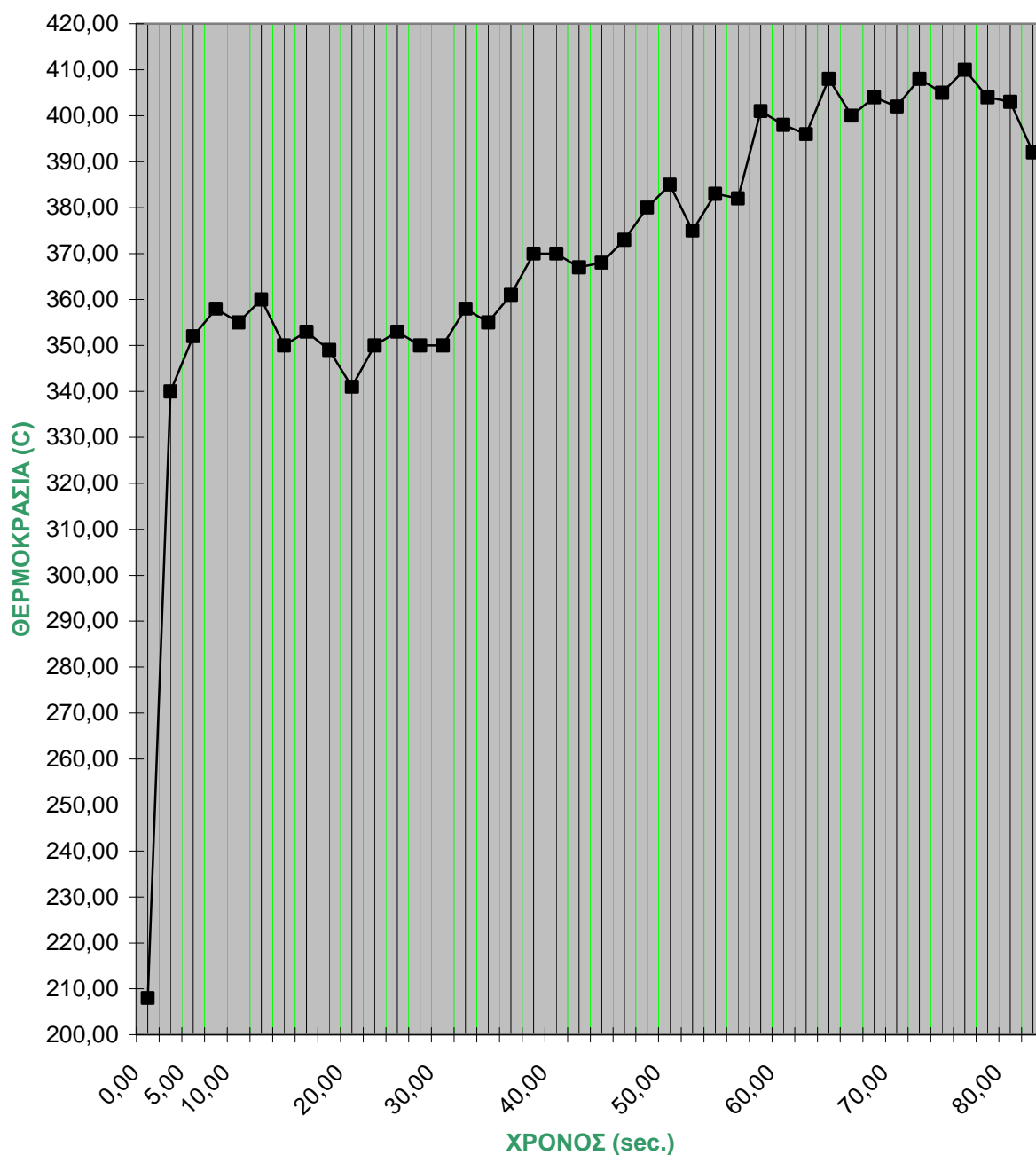
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ, ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (σ_χ), ΚΑΝΑΛΙ
1 ΘΕΣΗ ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 0 cm**



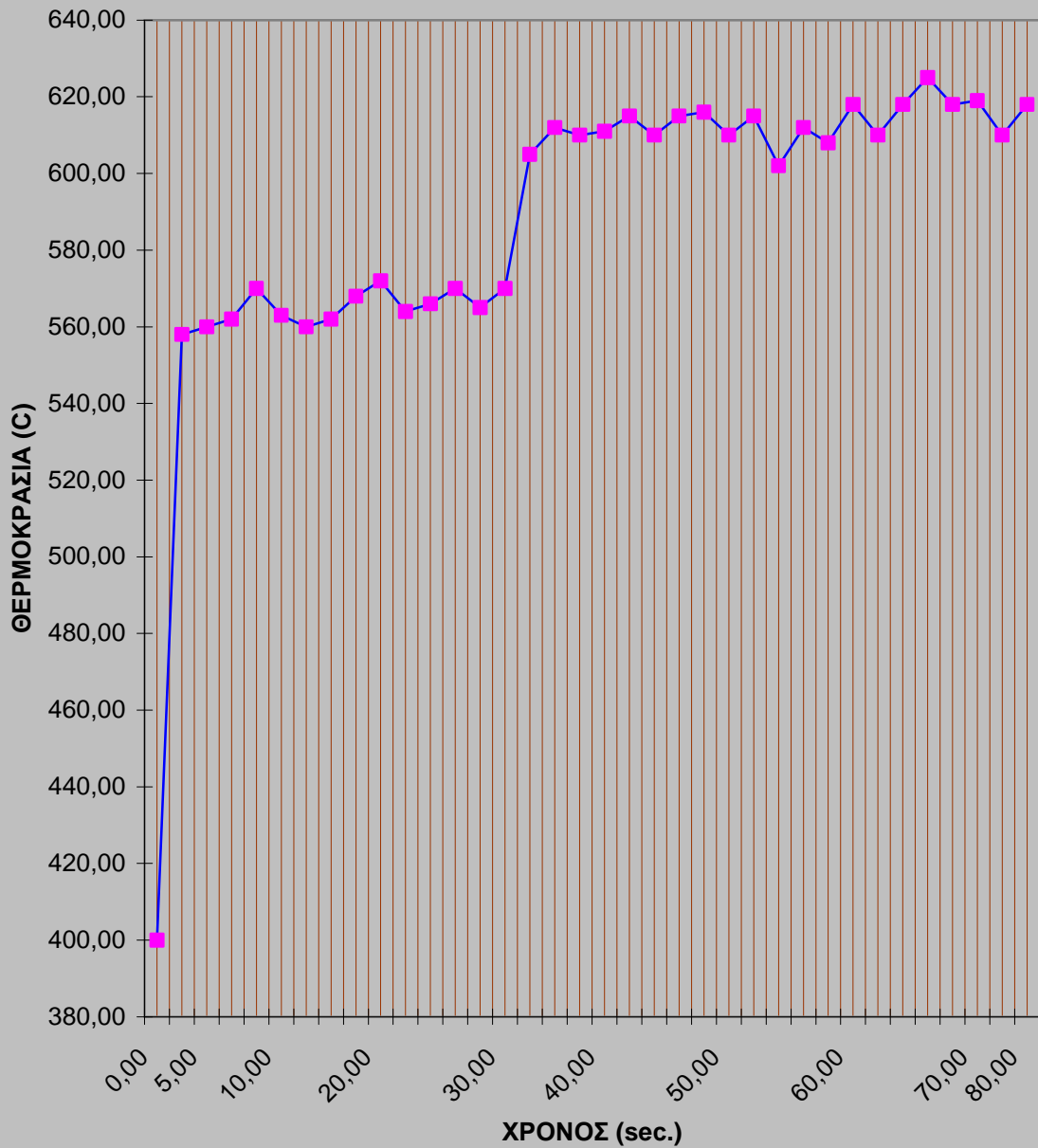
**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ, ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ), ΚΑΝΑΛΙ 1
ΘΕΣΗ ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 1,5 cm**



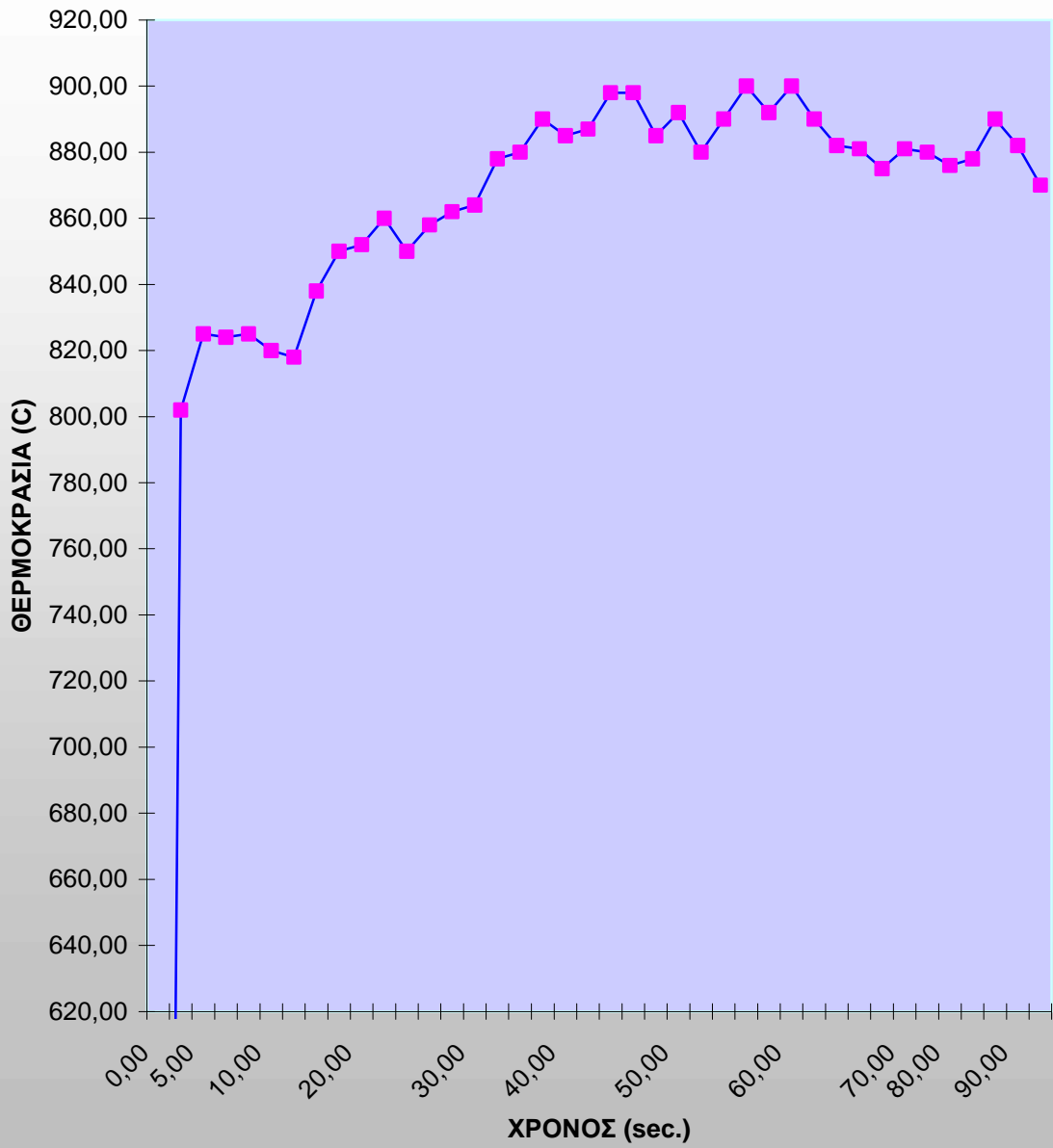
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ, ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ), ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ: 3 cm



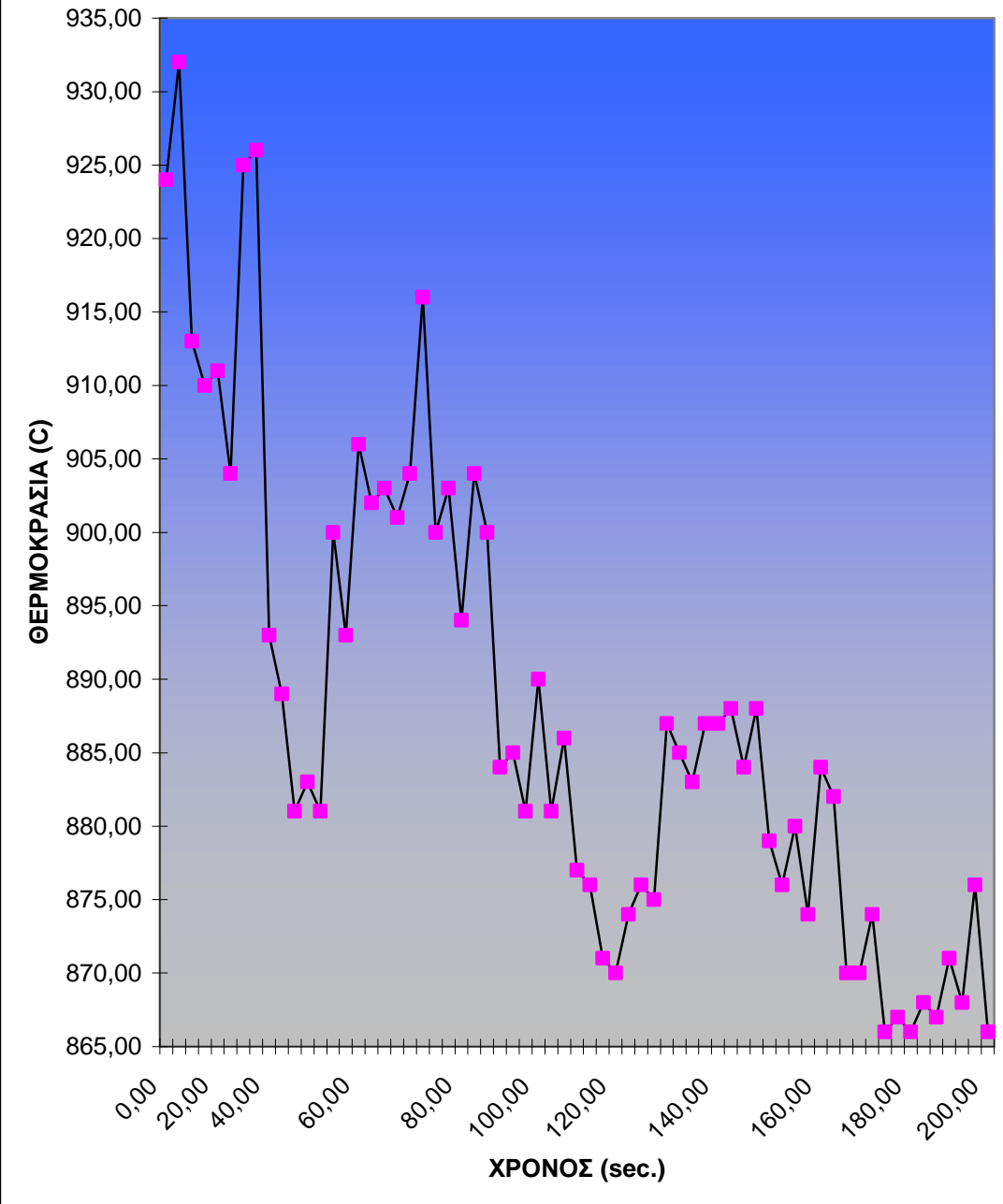
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ,ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ),ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ:4,5 cm



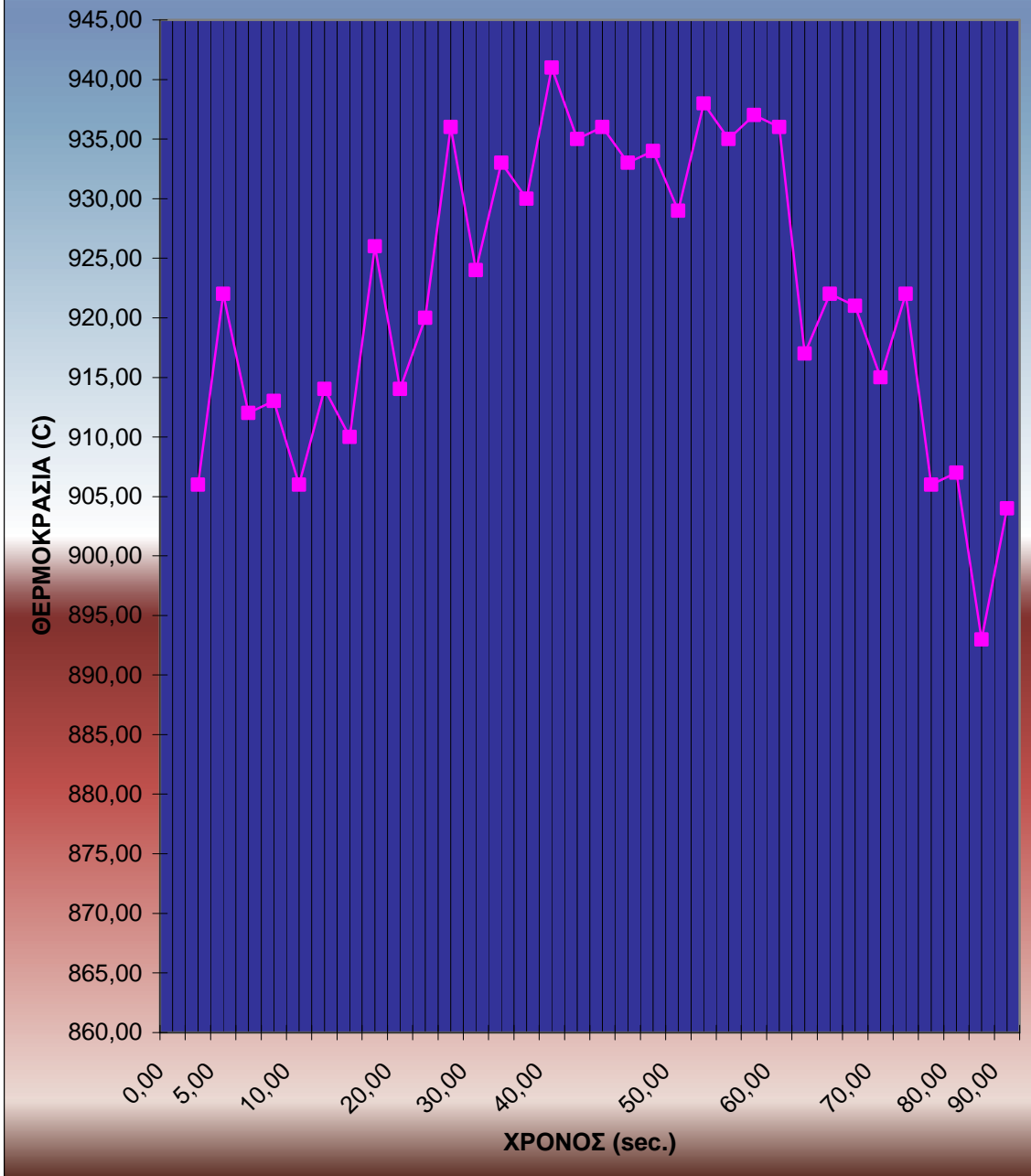
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ,ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ),ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ:6 cm



ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ,ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ),ΚΑΝΑΛΙ 1
ΘΕΣΗ ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ:7.5 cm



**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΛΟΓΑΣ,ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (μχ),ΚΑΝΑΛΙ 1 ΘΕΣΗ
ΠΥΡΟΜΕΤΡΟΥ:9 cm**



5.5 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Τα πειράματα που διεξήχθησαν με απευθείας ανάγνωση των θερμοκρασιών, χωρίς δηλαδή τη χρήση software, μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το αν η κίνηση του πυρομέτρου ήταν παράλληλη ή κάθετη στη διεύθυνση του εργαλειοφορείου, όπως και ανάλογα με το ύψος του πυρομέτρου από τον καυστήρα. Τα πειράματα της ίδιας κατηγορίας μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το αν ο καυστήρας ήταν αλφαδιασμένος παράλληλα ή κάθετα στη διεύθυνση του πυρομέτρου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να βρεθεί το κατά πόσο επηρεάζει ο κάθε παράγοντας με τη μορφή του θερμοκρασιακού προφίλ. Τα πειράματα τα οποία έχουν γίνει με κάθετη κίνηση του πυρομέτρου στη διεύθυνσή του είναι δώδεκα (12), ενώ τα πειράματα με παράλληλη κίνηση είναι οχτώ (8). Τα κάθετα προφίλ μπορούμε να τα χωρίσουμε σε τρεις ομάδες ως εξής:

Η πρώτη περιέχει έξι (6) πειράματα με το ίδιο αλφάδιασμα καυστήρα (κάθετο) σε ύψος 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm αντίστοιχα. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τρία (3) προφίλ κάθετα στη διεύθυνση του πυρομέτρου με τον καυστήρα αλφαδιασμένο σε διεύθυνση κάθετη σ' αυτή σε ύψος 10, 20, 10 και 20cm (ταυτόχρονα). Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει πειράματα όμοια με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι ο καυστήρας είναι αλφαδιασμένος σε διεύθυνση παράλληλη σ' αυτή του πυρομέτρου.

Τα παράλληλα προφίλ μπορούμε να τα χωρίσουμε κι αυτά σε τρεις ομάδες:

Η πρώτη περιέχει τρία πειράματα σε ύψος 10, 20, 10 και 20cm (ταυτόχρονα) με τον καυστήρα αλφαδιασμένο σε διεύθυνση κάθετη σ' αυτή του πυρομέτρου. Η δεύτερη περιέχει όμοια πειράματα με την πρώτη με διαφορά στο αλφάδιασμα του καυστήρα (παράλληλο). Η τρίτη

ομάδα περιλαμβάνει δύο πειράματα στο ίδιο ύψος (20cm) με διαφορετικές παροχές αέρα - καυσίμου. Το κέντρο της φλόγας βρίσκεται στα 10, 5 cm όταν μετράμε μέχρι 21 cm και στα 10 cm όταν η απόσταση είναι 20 cm.

Αν παρατηρήσουμε τα κάθετα και τα παράλληλα προφίλ, παρατηρούμε ότι τα πρώτα έχουν μικρή απόκλιση από το θεωρητικό και αναμενόμενο προφίλ. Παρουσιάζουν δηλαδή τις μέγιστες τιμές θερμοκρασίας εκατέρωθεν του κέντρου της φλόγας, ενώ ταυτόχρονα έχουν και συμμετρία σε σχετικό βέβαια βαθμό. Αντίθετα τα παράλληλα στη διεύθυνση του θερμοστοιχείου προφίλ έχουν μεγάλη απόκλιση από το θεωρητικό καθώς παρουσιάζουν ένα μέγιστο στο κέντρο περίπου της φλόγας. Επομένως το πρώτο συμπέρασμα που βγάζουμε είναι ότι οι μετρήσεις με κίνηση του θερμοστοιχείου κάθετα στη διεύθυνσή του δίνουν διαγράμματα ποιοτικά καλύτερα από αυτά με παράλληλη.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στα κάθετα προφίλ περιλαμβάνονται έξι (6) πειράματα σε ύψος 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm. Παρατηρώντας τα βλέπουμε ότι όσο πιο μακριά βρισκόμαστε από το κέντρο της φλόγας, όσο πιο ψηλά βρίσκεται το πυρόμετρο τόσο μεγαλύτερη θερμοκρασία δείχνει. Η συσχέτιση αυτή αντιστρέφεται καθώς πλησιάζουμε στο κέντρο της φλόγας, όπου όσο χαμηλότερα βρίσκεται το πυρόμετρο τόσο μεγαλύτερη θερμοκρασία δείχνει. Τα διαγράμματα αυτής της ομάδας είναι όμοια μεταξύ τους με το χαρακτηριστικό ότι όσο πιο χαμηλά βρίσκεται το πυρόμετρο τόσο πιο ομαλά μεταβάλλεται η θερμοκρασία (θα μπορούσαμε να πούμε η καμπύλη της θερμοκρασίας, αλλά αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές, διότι οι μετρήσεις δεν έχουν το χαρακτηριστικό της συνέχειας αλλά είναι διακριτές. Στα διαγράμματα τα σημεία είναι ενωμένα για καλύτερη και πιο εύκολη επεξεργασία και παρατήρησή τους).

Προχωρώντας στις δύο άλλες κατηγορίες των κάθετων προφίλ βλέπουμε την επίδραση του αλφαδιάσματος του καυστήρα στη μορφή των διαγραμμάτων. Αν αντιπαραβάλλουμε τα προφίλ στο ίδιο ύψος αλλά με

διαφορετική διεύθυνση αλφαδιάσματος του καυστήρα βλέπουμε ότι όταν ο καυστήρας είναι αλφαδιασμένος παράλληλα με το πυροόμετρο η μεταβολή της θερμοκρασίας γίνεται πιο ομαλά, ενώ στο κάθετο αλφάδιασμα η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται πιο απότομα. Εκτός απ' αυτή τη διαφορά τα διαγράμματα έχουν σχετική ομοιότητα.

Το συμπεράσμα που βγάλαμε προηγουμένως επαληθεύεται και στην περίπτωση των παράλληλων στη διεύθυνση του πυρομέτρου προφίλ με διαφορετικό αλφάδιασμα του καυστήρα. Βλέπουμε δηλαδή ότι τα διαγράμματα με το ίδιο ύψος πυρομέτρου διαφέρουν στην αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν ο καυστήρας είναι αλφαδιασμένος στη διεύθυνση του πυρομέτρου η μεταβολή της θερμοκρασίας γίνεται με πιο ομαλό τρόπο, όπως δηλαδή συνέβαινε και πριν με τα κάθετα στη διεύθυνση του πυρομέτρου προφίλ. Παρατηρώντας τα δύο πειράματα στο ίδιο ύψος αλλά με διαφορετικές παροχές βλέπουμε ότι είναι σχετικά όμοια μεταξύ τους με τη διαφορά ότι οι θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες όταν έχουμε υψηλότερες παροχές εκτός από τη μέγιστη που πρακτικά παραμένει η ίδια.

Ένα άλλο στοιχείο που προκύπτει είναι ότι αν εξετάσουμε τα συμμετρικά σημεία ως προς το κέντρο της φλόγας, τότε βλέπουμε ότι οι θέσεις που μετρήθηκαν αργότερα παρουσιάζουν αρκετά αυξημένη θερμοκρασία. Δηλαδή αν για παράδειγμα πάρουμε τα σημεία 3 και 18 cm η θερμοκρασία στα 18 cm είναι μεγαλύτερη αν και θα έπρεπε να είναι η ίδια. Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση θερμότητας από το μετρητικό όργανο. Το φαινόμενο παρατηρείται σε πιο έντονο βαθμό στα παράλληλα προφίλ όπου υπάρχει συνεχής παραμονή του πυρομέτρου μέσα στη φλόγα και επομένως μεγαλύτερη απορρόφηση θερμότητας.

Όλα τα διαγράμματα έχουν βαθμονόμηση στον άξονα της θερμοκρασίας από 0 έως 1200 °C για να μπορεί να υπάρχει και σχετική σύγκριση. Στους πίνακες αποτελεσμάτων υπάρχει η ομάδα πειραμάτων σύμφωνα με τον διαχωρισμό που είπαμε προηγουμένως, ο αύξων αριθμός

του πειράματος, το ύψος του θερμοστοιχείου, το είδος του προφίλ (κάθετο / παράλληλο), το αλφάδιασμα του καυστήρα, οι παροχές αέρα και καυσίμου και τέλος η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά την έναρξη και λήξη του πειράματος.

Όσον αφορά τις μετρήσεις μέσω υπολογιστή, το συγκεκριμένο software μας δίνει τη δυνατότητα να πάρουμε διάγραμμα μέσης τιμής των μετρήσεων, διάγραμμα RMS, και διάγραμμα τυπικής αποκλίσεως. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας της φλόγας ή τη μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ανάλογα με ποιο κανάλι επιλέγουμε. Στο κανάλι 0 που υπάρχει πυρόμετρο τύπου K έχουμε τη μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ενώ στο κανάλι 1 που έχουμε πυρόμετρο τύπου B αντιστοιχεί η θερμοκρασία της φλόγας.

Μέσω του software έχουν γίνει επτά (7) πειράματα με ύψος πυρομέτρου 20 cm και μετατόπιση του πυρομέτρου κατά 1,5 cm σε προφίλ κάθετο. Γίνεται δηλαδή μέτρηση από 0 cm που αντιστοιχούν στην άκρη του προφίλ μέχρι 9 cm που αντιστοιχούν στο κέντρο της φλόγας. Για το πρώτο πείραμα υπάρχουν και τα έξι διαγράμματα, τρία για τη φλόγα και τρία για το περιβάλλον, ενώ για τα υπόλοιπα έξι τα διαγράμματα μέσης τιμής της θερμοκρασίας της φλόγας.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα μέσης τιμής με τις αντίστοιχες τιμές κάθετου προφίλ σε ύψος 20 cm στις αντίστοιχες θέσεις παρατηρούμε ότι έχουμε σημαντική διαφορά στις τιμές θερμοκρασίας εκτός από τις θέσεις κοντά στο κέντρο της φλόγας. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι κατά την επεξεργασία του σήματος αφαιρείται η θερμοκρασία περιβάλλοντος που λαμβάνεται στο κανάλι 0.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μ.ΦΟΥΝΤΗ: ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ, ΕΚΔΟΣΗ Ε.Μ.Π. (1992).
- [2] Ν. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ: ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι – ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 1991.
- [3] Σ. Ε. ΣΙΜΟΠΟΥΛΟΥ: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ, ΕΚΔΟΣΗ Ε.Μ.Π., 1989.
- [4] Μ. Β. ΚΗΑΛΙΛ, F. Μ. ΕΛ – ΜΑΗΑΛΑΥΥ ΑΝΔ S. Α. ΦΕΡΑΓ: ΑCСURASY OF TEMPERATURE MEASUREMENTS IN FURNACES, (PAPER), 1976.
- [5] ANALOG DEVICES, 5B SERIES BACKPLANES AND MOUNTING CARDS,
[http:// www.analog.com/industry/ios/IOS_Catalog/5b/5b_bc_cd.html](http://www.analog.com/industry/ios/IOS_Catalog/5b/5b_bc_cd.html)
ANALOG DEVICES, 5B37 ISOLATED THERMOCOUPLE INPUT,
[http:// www.analog.com/industry/ios/IOS_Catalog/5b/5b37ctlg.html](http://www.analog.com/industry/ios/IOS_Catalog/5b/5b37ctlg.html)
- [6] D. POTTER: MEASURING TEMPERATURE WITH THERMOCOUPLES – A TUTORIAL, NATIONAL INSTRUMENTS, 1996.
- [7] Π. ΚΟΥΤΜΟΣ, ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ, ΕΚΔΟΣΗ ΠΑΝ. ΠΑΤΡΩΝ (2002).
- [8] www.google.com
- [9] www.mit.edu
- [10] Κ.ΜΑΥΡΙΔΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΕΚΔ. ΙΩΝ,2005.
- [11] Ι. ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, 2006.