



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΛΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΚΑΥΣΗΣ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ,
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Δρ. ΜΑΡΙΑ ΦΟΥΝΤΗ



ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μίας εργαστηριακής διάταξης για την μελέτη φαινομένων καύσης σε πρότυπους καυστήρες. Η διάταξη αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει ολοκληρωμένο σύστημα παροχής και ελέγχου ροής αερίων καυσίμων και αέρα, συστήματα απαγωγής καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα ασφαλείας. Η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της δομής της φλόγας σε δύο πρότυπους καυστήρες υπό ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης εκτενείς μετρήσεις θερμοκρασίας και χημικών ειδών. Η δομή της εργασίας είναι η εξής: Αρχικά περιγράφεται διεξοδικά η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης της εργαστηριακής διάταξης και παρατίθεται αναλυτικό εγχειρίδιο λειτουργίας της. Εν συνεχεία περιγράφεται η μετρητική μεθοδολογία και η διαδικασία λήψης μετρήσεων. Τέλος παρουσιάζονται ποιοτική χαρτογράφηση της δομής της φλόγας και ποσοτικές μετρήσεις θερμοκρασιών και χημικών ειδών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Μαρία Φούντη, Καθηγήτρια του Τομέας Θερμότητας του Ε.Μ.Π. για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ και να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. κ. Γιώργο Σκεύη για τις συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του σε όλη την διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες κ.κ. Γιώργο Ζάννη και Γιάννη Μανδηλαρά καθώς και τον κ. Μπάμπη Μαυράκη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν. Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τους συμφοιτητές μου, κα. Μαρία Κουρή και κ. Κώστα Ζαγκουδάκη όχι μόνο για την πολύτιμη βοήθεια που μου δώσανε, αλλά και για την υπομονή που επέδειξαν. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλη την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1. ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	5
1.2. ΦΛΟΓΕΣ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΛΟΓΩΝ.....	6
1.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΩΣΕΣ ΡΟΕΣ – ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	9
1.4. ΣΚΟΠΟΣ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	12
2.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	16
2.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	20
2.2.1. ΕΝΑΡΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	20
2.2.2. ΛΗΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	
ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	23
3.1. ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	23
3.1.1. ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ Κ.....	23
3.1.2. ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ ThermaCAM PM595.....	34
3.1.3. ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ MRU Delta 2000 CD – IV.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	43
4.1. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΛΟΓΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ.....	43
4.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ.....	58
4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ.....	69
4.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΠΟΡΩΔΗ ΚΑΥΣΤΗΡΑ.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

Καύση μπορούμε να ονομάσουμε κάθε εξώθερμη αντίδραση υλικού καυσίμου με οξυγόνο (ή αέρα), που συντελείται με αρκετά μεγάλο βαθμό απόδοσης θερμότητας, έτσι ώστε η εκπεμπόμενη ενέργεια υπό τη μορφή θερμότητας να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη. Ελάχιστη προϋπόθεση είναι η εκπεμπόμενη θερμότητα να είναι τόση ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η ενεργειακή αλληλουχία [1]:

ΧΗΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ → ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΥΣΗΣ → ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Μέσω των αντιδράσεων της καύσης, η χημική ενέργεια, η οποία βρίσκεται αποθηκευμένη στο καύσιμο, με τη βοήθεια του οξειδωτικού μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ταχεία χημική αντίδραση καυσίμου και οξειδωτικού δημιουργεί οξείδια, τα οποία με τη σειρά τους σχηματίζουν τα καυσαέρια. Η βασική διαφορά με την οξείδωση, είναι ότι κατά την οξείδωση, π.χ. μετάλλων, η αντίδραση είναι βραδεία, η αποδιδόμενη θερμότητα είναι χαμηλή και οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες δεν είναι τόσο υψηλές ώστε να επιτρέψουν την εμφάνιση φλόγας (για παράδειγμα, οι νέες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου περιορίζονται έως τους περίπου 1000 °C ώστε να μην δημιουργηθεί φλόγα). Σχεδόν σε όλες τις τεχνικές εφαρμογές και διαδικασίες, η καύση εξελίσσεται σε τυρβώδες πεδίο ροής. Αυτό γίνεται γιατί η παρουσία της τύρβης αυξάνει την ανάμειξη των αντιδρώντων και έτσι προωθεί την αποτελεσματικότερη εξέλιξη της καύσης, ενώ απ' την άλλη, η ίδια η καύση δημιουργεί τύρβη λόγω των διαταραχών και διακυμάνσεων της ροής από την έκλυση θερμότητας.

Η καύση των περισσότερων ειδών καυσίμου, γίνεται με την χρήση *καυστήρων*, στόχος των οποίων είναι η διατήρηση των συνθηκών καύσης σε επιθυμητά επίπεδα. Μεταξύ των άλλων, οι καυστήρες, παρέχουν επαρκείς (ανάλογα με το εκάστοτε φορτίο) ποσότητες καυσίμου και αέρα καύσης στον χώρο του θαλάμου καύσης, εξασφαλίζοντας κατά το δυνατόν καλύτερη ανάμειξή τους, διασκορπίζουν τα υγρά καύσιμα σε σταγονίδια, ώστε αυτά να καούν αποτελεσματικότερα, δημιουργούν και διατηρούν την ανάφλεξη με κατάλληλες διατάξεις και ελέγχουν τον λόγο αέρα καυσίμου.

Οι καυστήρες διοχετεύουν το μείγμα αέρα και καυσίμου στον θάλαμο καύσης, ο οποίος παρέχει ένα ελεγχόμενο περιβάλλον για την εξέλιξη των φαινομένων της καύσης. Το σχήμα και το μέγεθος του θαλάμου καύσης, εξασφαλίζει την πλήρη καύση του καυσίμου, πριν αυτό φτάσει στην έξοδο, από την οποία διαφεύγουν τα καυσαέρια. Ο θάλαμος καύσης, γενικά κατασκευάζεται με την χρήση

π.χ. πυρότουβλων, τα οποία κατά περίπτωση διαθέτουν και μόνωση. Τα τοιχώματα του μπορεί να είναι υδρόψυκτα, ακάλυπτα ή μονωμένα, ενώ συνήθως καλύπτονται εξωτερικά με μεταλλικό κέλυφος. Τα καυσαέρια, οδηγούνται μετά την έξοδό τους είτε σε κατάλληλες συσκευές απορρύπανσης (σακκόφιλτρα, ηλεκτροστατικά φίλτρα, κυκλωνικοί διαχωριστές κ.α.) είτε απευθείας στο περιβάλλον.

Οι *καυστήρες των υγρών και αέριων καυσίμων*, διαχωρίζονται σε καυστήρες **προανάμιξης** και σε καυστήρες **διάχυσης**. Οι *καυστήρες φυσικού αερίου*, διακρίνονται σε : **δακτυλιοειδείς καυστήρες, καυστήρες κέντρου διάχυσης, καυστήρες στροβιλώδους ροής**. Υπάρχουν επίσης οι **καυστήρες πετρελαίου**, οι **καυστήρες διπλού καυσίμου** και οι **καυστήρες στερεών καυσίμων**, οι οποίοι διακρίνονται σε : **καυστήρες κονιοποιημένου άνθρακα** και **καυστήρες εσχάρας**. Εκτός των καυστήρων, υπάρχουν οι *λέβητες*, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, καθώς και οι *φούρνοι*.

1.2. ΦΛΟΓΕΣ – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΦΛΟΓΩΝ

Ανάλογα με τον τρόπο ανάμιξης του καυσίμου με το οξειδωτικό, οι φλόγες διακρίνονται σε *προανάμιξης* και φλόγες *διάχυσης*, ενώ με συνδυασμό των δύο μπορεί να προκύψουν φλόγες *μερικής προανάμιξης*.

Οι φλόγες προανάμιξης φέρουν σε πλήρη ανάμιξη το μίγμα αντιδρώντων πριν από την έναυση, με κλασικό παράδειγμα φλόγας προανάμιξης το λύχνο Bunsen ο οποίος περιγράφεται παρακάτω. Αντιθέτως, στις φλόγες διάχυσης δεν γίνεται προανάμιξη του μίγματος αντιδρώντων πριν από την έναυση, δηλαδή η ανάμιξη του καυσίμου – οξειδωτικού γίνεται ταυτόχρονα με την καύση. Ένα τυπικό παράδειγμα φλόγας διάχυσης είναι η φλόγα του κεριού όπου οι παραφίνες του κεριού, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, εξατμίζονται, αναμιγνύονται με τον περιβάλλοντα αέρα με την βοήθεια των ανοδικών ρευμάτων που επικρατούν και μόλις επιτευχθούν κατάλληλες συνθήκες γίνεται η έναυση. Στις φλόγες μερικής προανάμιξης τα αντιδρώντα αναμιγνύονται μερικώς πριν έρθουν τελικώς σε επαφή για να αντιδράσουν με την βοήθεια μοριακής και τυρβώδους διάχυσης.

Μια άλλη ταξινόμηση των φλογών μπορεί να γίνει ανάλογα με τη ροή που επικρατεί στην περιοχή της φλόγας. Έτσι, *οι φλόγες διαχωρίζονται σε στρωτές και τυρβώδεις*. Ως κριτήριο διαχωρισμού χρησιμοποιείται ο αριθμός Reynolds, Re , για τιμές του οποίου μικρότερες ή μεγαλύτερες από 10^3 η φλόγα θεωρείται στρωτή ή τυρβώδης. Οι στρωτές φλόγες δεν βρίσκουν πολλές πρακτικές εφαρμογές σε αντίθεση με τις τυρβώδεις αλλά αποτελούν αντικείμενο εργαστηριακών μελετών και βασικής έρευνας.

Εκτός από τον αριθμό Reynolds, Re , μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο λόγος αέρα καυσίμου ϕ . Ο λόγος αέρα καυσίμου προσδιορίζεται γράφοντας απλά χημικά ισοζύγια,

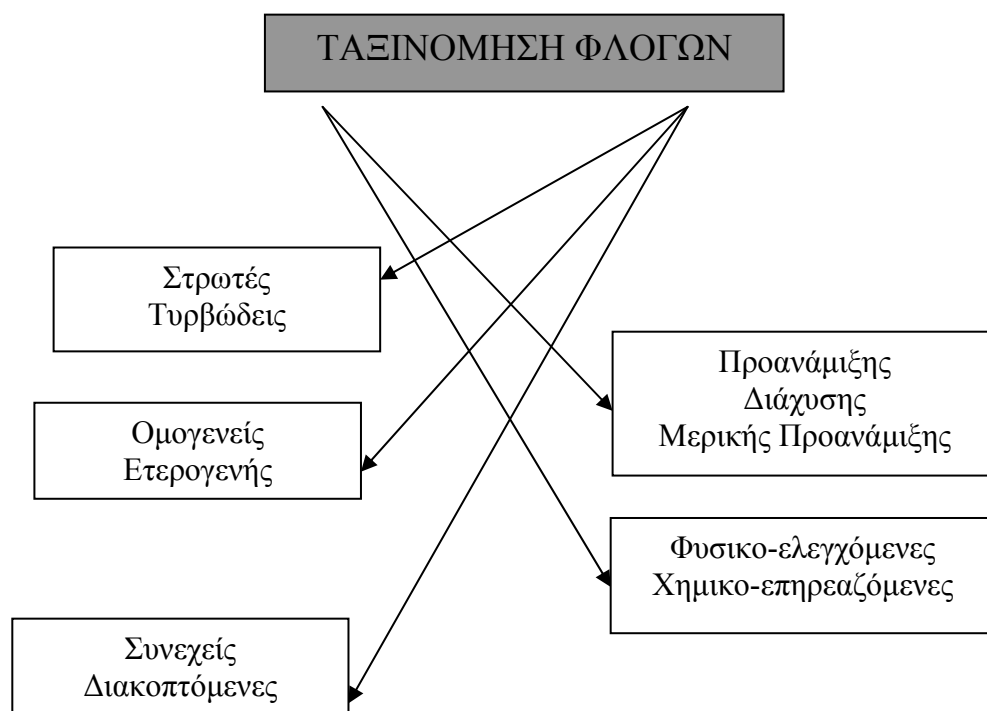
υποθέτοντας ότι το καύσιμο αντιδρά για τον σχηματισμό του ιδανικού μείγματος προϊόντων. Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου, ϕ , ορίζεται ως εξής:

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{\text{στοιχ}}},$$

όπου $(F/A)_{\text{στοιχ}}$ είναι η στοιχειομετρική αναλογία (κατ' όγκον ή κατά μάζα) καυσίμου – αέρα και (F/A) είναι η αναλογία (κατ' όγκον ή κατά μάζα) καυσίμου - αέρα στην συγκεκριμένη φλόγα.

Αν χρησιμοποιηθεί περισσότερη από την στοιχειομετρική ποσότητα του οξειδωτικού, τότε το μείγμα χαρακτηρίζεται ως πτωχό σε καύσιμο ($\phi < 1$), ενώ αν χρησιμοποιηθεί λιγότερη ποσότητα οξειδωτικού από την στοιχειομετρική, έχουμε μείγμα πλούσιο σε καύσιμο ($\phi > 1$). Για ένα στοιχειομετρικό μείγμα το ϕ είναι ίσο με την μονάδα.

Άλλη μέθοδος ταξινόμησης των φλογών και ανάλογα με τη κατάσταση των αντιδρώντων κατά την διάρκεια της καύσης. Έτσι ένα σύστημα ονομάζεται *ομογενές* όταν τα αντιδρώντα βρίσκονται στην ίδια κατάσταση (π.χ. αέρια, στερεά, υγρά), οι ιδιότητες είναι παντού οι ίδιες και δεν αλλάζουν με τον χώρο ή τον χρόνο, γεγονός που εμφανίζεται μόνο σε εργαστηριακές εφαρμογές. *Ετερογενή* είναι τα συστήματα τα οποία εφαρμόζονται ευρέως στην πράξη όπου η κατάσταση του καυσίμου – οξειδωτικού είναι διαφορετική, η σύσταση του καυσίμου και οι φυσικές του ιδιότητες μεταβάλλονται στον χώρο, λόγω των μηχανισμών μεταφοράς, (συναγωγής, διάχυσης) και λόγω της θερμότητας που παράγεται από τις χημικές αντιδράσεις.



Σχήμα 1.1. Ταξινόμηση των φλογών αερίων καυσίμων με βάση διαφορετικά κριτήρια.

Άλλος διαχωρισμός των φλογών μπορεί να γίνει με βάση το είδος του μηχανισμού που ελέγχει την αντίδραση καύσης. Έτσι, έχουμε τις φυσικό-ελεγχόμενες φλόγες στις οποίες οι χημικές

αντιδράσεις είναι τόσο γρήγορες ώστε η χημική κινητική του συστήματος να μην παίζει κανένα ρόλο. Αντίστροφα, υπάρχουν και οι χημικό- επηρεαζόμενες φλόγες (Σχήμα 1.1.) στις οποίες ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας εξαρτάται κυρίως από τη χημική κινητική της αντίδρασης καύσης.

Τέλος, υπάρχουν οι κατηγορίες των *συνεχών και διακοπτόμενων* φλογών [1]. Συνεχής είναι η καύση στην οποία η διαδικασία έκχυσης καυσίμου και οξειδωτικού γίνεται συνεχώς χωρίς διακοπές, ενώ παράλληλα τα καυσαέρια απάγονται συνεχώς. Τέτοιο παράδειγμα είναι οι εστίες κεντρικής θέρμανσης και οι αεριοστρόβιλοι, ενώ χαρακτηριστικό παράδειγμα διακοπτόμενης φλόγας έχουμε στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Από όλα τα κριτήρια ταξινόμησης των φλογών τα πιο σημαντικά είναι το είδος της φλόγας που διαμορφώνεται με βάση την προανάμιξη ή μη του μίγματος των αντιδρώντων πριν την έναυση και παρουσία ασθενούς ή έντονης τύρβης, δηλαδή μικρός ή μεγάλος αριθμός Reynolds αντιδρώντων αντιστοίχως.

Οι *φλόγες προανάμιξης* χαρακτηρίζονται ως ταχύτητες, εξώθερμες αντιδράσεις καυσίμου και οξειδωτικού τα οποία έχουν αναμιχθεί πλήρως πριν από την καύση. Συνήθως, αυτού του είδους οι φλόγες ακτινοβολούν ελάχιστα και η θερμότητα της αντίδρασης μεταφέρεται σε μια λεπτή ζώνη με μικρή ταχύτητα καύσης (burning velocity). Το φαινόμενο της καύσης στις φλόγες προανάμιξης ελέγχεται από την χημική κινητική όπου ο ρυθμός της χημικής αντίδρασης καυσίμου – οξειδωτικού εξαρτάται κυρίως από την θερμότητα και από τις τοπικές συγκεντρώσεις των συστατικών που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση. Διακρίνονται σε στρωτές και σε τυρβώδεις φλόγες προανάμιξης ανάλογα με την ένταση της τύρβης. Οι στρωτές φλόγες έχουν χαρακτηριστική ταχύτητα στρωτής καύσης (laminar burning velocity S_1) ενώ οι τυρβώδεις έχουν συγκριτικά μεγαλύτερη ταχύτητα τυρβώδους καύσης από τις στρωτές λόγω της τύρβης (turbulent burning velocity, $S_t > S_1$).

Οι *φλόγες διάχυσης* προκύπτουν από την καύση μιγμάτων καυσίμου και οξειδωτικού που προσάγονται στον θάλαμο καύσης ως δύο διαφορετικά ρεύματα τα οποία καίγονται ενώ ταυτόχρονα αναμιγνύονται. Η χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ των δυο ρευμάτων των αντιδρώντων. Η ανάμιξη του μίγματος των αντιδρώντων είναι καθοριστική για τη διάδοση της φλόγας διάχυσης. Κυριαρχούν τα φαινόμενα μοριακής (και τυρβώδους) διάχυσης όπου ο ρυθμός καύσης εξαρτάται από τον ρυθμό με τον οποίο αναμειγνύεται το καύσιμο με το οξειδωτικό. Διακρίνονται και αυτές σε στρωτές ή τυρβώδεις φλόγες διάχυσης.

Στις περισσότερες διεργασίες καύσης, η έντονη τύρβη χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί αύξηση των ορίων μεταφοράς, άρα και των ρυθμών αντίδρασης ανά μονάδα όγκου, δηλαδή αύξηση της απόδοσης της μεταφοράς της έκλυσης θερμότητας σε μικρότερο χώρο. Παρ' όλα αυτά, οι έννοιες και οι αρχές των στρωτών φλογών είναι βασικές και αποτελούν τον κορμό για την κατανόηση και την ανάλυση των τυρβωδών φλογών.

1.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΩΣΕΣ ΡΟΕΣ – ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία σε ένα πρόγραμμα ενεργειακής διαχείρισης που περιλαμβάνει συστήματα καύσης, είναι το σύστημα των μετρικών διατάξεων και των οργάνων, τα οποία μετρούν και καταγράφουν τα διάφορα λειτουργικά μεγέθη της εγκατάστασης [1].

Πριν την διεξαγωγή κάθε ενεργειακής μέτρησης, είναι απαραίτητο να καθορίζονται με ακρίβεια και η λεπτομέρεια της πληροφορίας που αναμένεται να αξιοποιηθεί. Είναι συνεπώς απαραίτητο να προσδιορίζονται σαφώς η μεθοδολογία της μέτρησης, το είδος του εξοπλισμού (οργάνων μέτρησης), το πεδίο και η διάρκεια της μέτρησης.

Ένα μετρητικό όργανο, αποτελείται συνήθως από τα εξής στοιχεία: το μετρητικό στοιχείο, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τον φορέα του μετρούμενου μεγέθους (π.χ ρεύμα ρευστού), έναν ενισχυτή του σήματος και την φυσική μονάδα ένδειξης, η οποία «μεταφράζει» το σήμα σε κάποια ένδειξη (μηχανική ή ηλεκτρική). Το μετρητικό στοιχείο ενός οργάνου μέτρησης, έχει ως σκοπό την μέτρηση μιας λειτουργικής παραμέτρου της εγκατάστασης. Στην παρούσα εργασία σκοπός είναι η μέτρηση της *πίεσης*, της *ταχύτητας*, της *θερμοκρασίας* και της *χημικής σύστασης* (σε NOx και CO) στις δημιουργούμενες φλόγες.

Κάθε όργανο συνοδεύεται από μια καμπύλη βαθμονόμησης, τη συνάρτηση δηλαδή που συνδέει το φυσικό μέγεθος με την έξοδο του οργάνου, η οποία είναι συνήθως υπό μορφή ηλεκτρικής τάσης ή ρεύματος. Είναι επίσης γνωστό ότι κάθε όργανο μέτρησης διαθέτει και μια περιοχή λειτουργίας, η οποία ονομάζεται *εύρος μέτρησης*. Σε περίπτωση μέτρησης χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών, ορίζεται η ταχύτητα απόκρισης του οργάνου.

Αρνητικός παράγοντας, ο οποίος δυστυχώς δεν μπορεί να παραληφθεί, είναι η ύπαρξη σφαλμάτων (τυχαίων και συστηματικών), με αποτέλεσμα η μετρούμενη τιμή στην έξοδο του οργάνου, να διαφέρει συνήθως από την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ακρίβεια του οργάνου, εκφράζει το μέτρο της διαφοράς της πραγματικής από την μετρούμενη τιμή και εκφράζεται ως ποσοστό είτε του εύρους του οργάνου, είτε της ανώτατης μετρούμενης τιμής, είτε της τιμής μέτρησης (π.χ. ακρίβεια $\pm 2\%$ της ένδειξης του οργάνου).

Οι βασικές μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε φλόγες, είναι οι μετρήσεις της πίεσης, της ταχύτητας, της θερμοκρασίας και των χημικών ειδών. Υπάρχουν αρκετά όργανα μέτρησης της πίεσης και της ταχύτητας. Μερικά από αυτά είναι:

Μανόμετρα στήλης υγρού. Η λειτουργία των μανομέτρων στήλης υγρού, βασίζεται στην εξίσωση της υδροστατικής: $p = \rho \cdot g \cdot h$, όπου **p** είναι η διαφορά πίεσης ηρεμούντος υγρού πυκνότητας **ρ** , μεταξύ δύο επιπέδων υψομετρικής διαφοράς **h**. Οι τρεις βασικότεροι τύποι μανομέτρου στήλης υγρού είναι το βαρομετρικό, το υοειδές και το κεκλιμένο. Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων στα μανόμετρα αυτού του τύπου είναι η επίδραση της θερμοκρασίας του

περιβάλλοντος στην πυκνότητα του υγρού της στήλης καθώς και η επιφανειακή τάση του υγρού, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια επιπλέον ανύψωση της στάθμης του.

Σωλήνας Pitot. Ο σωλήνας Pitot, είναι ένας απλός σωλήνας, του οποίου το ένα άκρο είναι ανοικτό προς το ρευστό, ενώ το άλλο συνδέεται με το μανόμετρο. Εάν τοποθετηθεί παράλληλα προς το ρεύμα του ρευστού, καταγράφει την ολική πίεσή του, δεδομένου ότι το ρευστό στο άνοιγμά του ηρεμεί (σωλήνας αποκοπής). Παράγοντες που επιδρούν στην ακρίβεια των μετρήσεων του συγκεκριμένου σωλήνα είναι: Ο αριθμός Re, η κατανομή της ταχύτητας του ρευστού κ.α.

Σωλήνας Prandtl (Pilot Static): Με την βοήθεια του συγκεκριμένου σωλήνα μετράται η δυναμική πίεση σε μια θέση εντός του πεδίου ροής. Ο εν λόγω σωλήνας αποτελείται από έναν κύλινδρο, στο άκρο του οποίου υπάρχει κατάλληλη οπή κάθετη στο ρεύμα της ροής για την μέτρηση της ολικής πίεσης ($P_{ολ}$), ενώ σε μικρή απόσταση κατάντι υπάρχει μια διάταξη οπών παράλληλων στο ρεύμα της ροής, για την μέτρηση της στατικής πίεσης ($P_{στατ}$).

Υπάρχει επίσης το *ανεμόμετρο θερμού νήματος*, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την μέτρηση ταχύτητας αερίων, καθώς και το *ανεμόμετρο με αισθητήρια πτερωτής*, που χρησιμοποιείται για την μέτρηση ρευμάτων αέρα σε μεγάλους χώρους.

Εκτός από τα όργανα μέτρησης της πίεσης και της ταχύτητας υπάρχουν και τα όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας. Χωρίζονται σε μηχανικά και ηλεκτρικά, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους. Μερικά από αυτά είναι:

Τα υδραργυρικά θερμόμετρα: Τα συγκεκριμένα θερμόμετρα είναι απλές συσκευές αποτελούμενες από έναν κατάλληλο βαθμονομημένο γυάλινο σωλήνα, ο οποίος περιέχει ποσότητα υδραργύρου.

Τα διμεταλλικά θερμόμετρα: Τα συγκεκριμένα θερμόμετρα αποτελούνται από δύο συγκολλημένα λεπτά ελάσματα μετάλλου, τα οποία έχουν διαφορετικούς συντελεστές διαστολής.

Τα θερμοστοιχεία: Η λειτουργία των θερμοστοιχείων βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck, κατά το οποίο όταν δύο μεταλλικοί αγωγοί διαφορετικών υλικών έρθουν σε επαφή στα άκρα τους, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη, που οφείλεται σε καθαρά θερμικά αίτια, και της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από την θερμοκρασία του σημείου επαφής. Το σημείο επαφής χρησιμοποιείται ως αισθητήριο θερμοκρασίας, με μετρούμενο μέγεθος τη αναπτυσσόμενη θερμοηλεκτρική τάση στα άκρα του. Η επαφή αναφοράς πρέπει να διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία (συνήθως 0 °C), είτε με φυσικό (δοχείο γεμάτο πάγο), είτε με ηλεκτρονικό (τρανζίστορ ηλεκτρονικού σημείου πάγου) τρόπο. Υπάρχουν πολλοί τύποι θερμοστοιχείων (J,K,B,E,R,S,T), οι οποίοι διαφέρουν ως προς το υλικό κατασκευής τους.

Υπάρχουν επιπλέον τα *θερμόμετρα αντίστασης (RTD)*, τα οποία βασίζονται στην ιδιότητα μερικών μετάλλων, μεταβαλλόμενης της εξωτερικής θερμοκρασίας, να μεταβάλλεται η ηλεκτρική αντίστασή τους καθώς και τα *πυρόμετρα ακτινοβολίας*, που βασίζουν την λειτουργία τους στο

γεγονός ότι τα αντικείμενα κάθε είδους ακτινοβολούν διαφορετικά ποσά ενέργειας, ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται.

Σημαντικά όργανα μέτρησης αποτελούν τα όργανα ανάλυσης καυσαερίων. Η μέτρηση και η ανάλυση των αέριων προϊόντων (καυσαερίων) ενός συστήματος καύσης, δίνει σημαντικά στοιχεία για τον προσδιορισμό τόσο του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας της καύσης, όσο και των εκπεμπόμενων από την εγκατάσταση ρύπων. Τα συνηθέστερα μετρούμενα αέρια συστατικά των καυσαερίων, είναι το

Οξυγόνο (O_2), το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO , CO_2), το διοξείδιο του θείου (CO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι υδρογονάνθρακες (C_xH_y), η αιθάλη και τα στερεά σωματίδια.

Ένα σημαντικό όργανο μέτρησης αποτελεί ο *αναλυτής οξειδίων του αζώτου (NO_x)*. Τα οξείδια του αζώτου, αποτελούν παραπροϊόντα της διαδικασίας της καύσης και θεωρούνται σημαντικοί ρύποι. Η μέτρηση της περιεκτικότητάς τους βασίζεται στην αρχή της *χημικοφωταύγιας*, της φωτοχημικής αντίδρασης δηλαδή μεταξύ όζοντος (O_3) και μονοξειδίου του αζώτου (NO), κατά την οποία παράγεται διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και οξυγόνο (O_2). Η συσκευή μέτρησης, διαθέτει μια μονάδα παραγωγής όζοντος και μια μονάδα μετατροπής του υπάρχοντος NO_2 στα καυσαέρια σε NO .

Άλλα όργανα ανάλυσης είναι: ο *αναλυτής οξυγόνου*, ο *αναλυτής υδρογονανθράκων*.

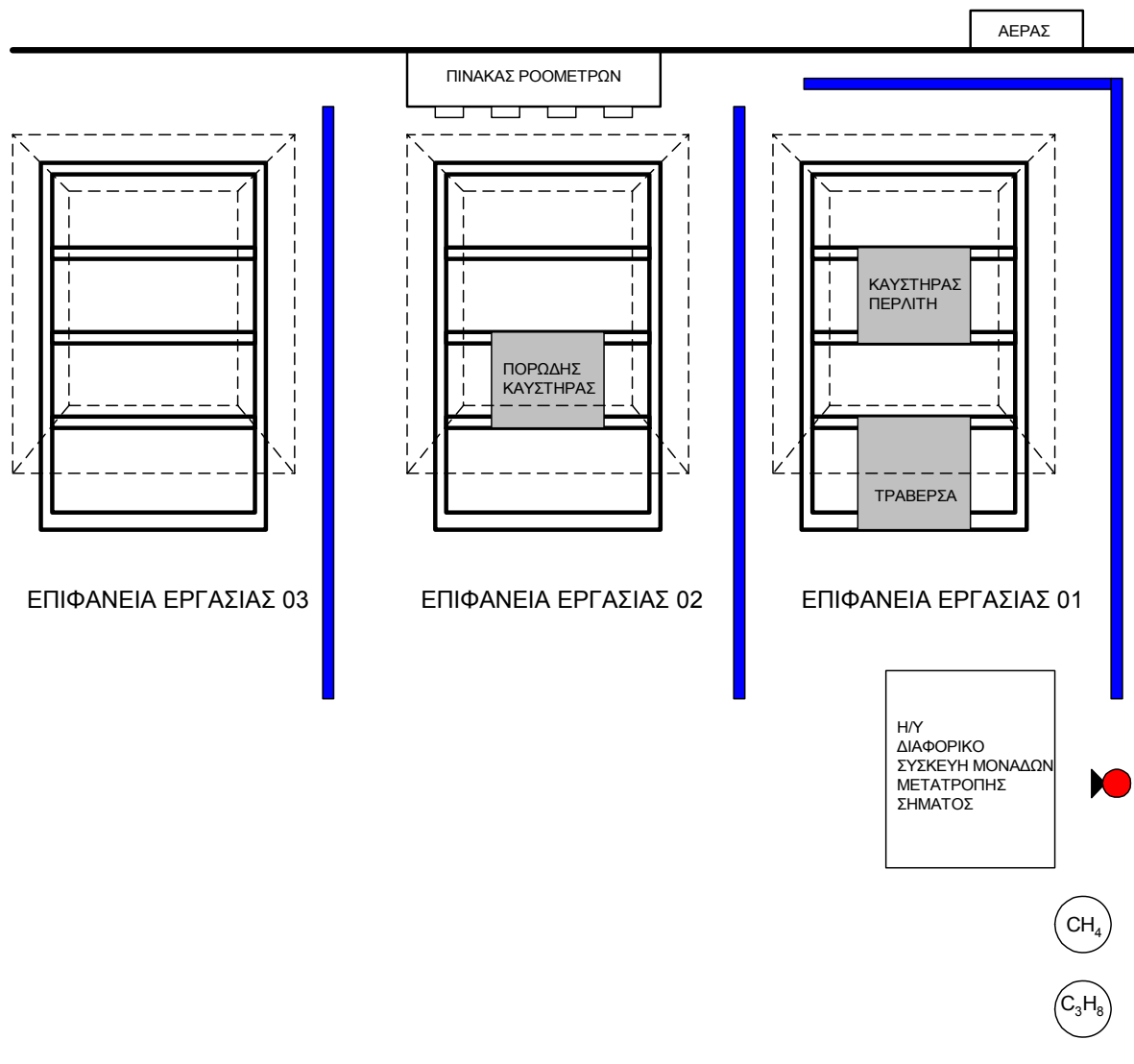
1.4. ΣΚΟΠΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση μίας εργαστηριακής διάταξης για την μελέτη φαινομένων καύσης σε πρότυπους καυστήρες. Η διάταξη αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει ολοκληρωμένο σύστημα παροχής και ελέγχου ροής αερίων καυσίμων και αέρα, συστήματα απαγωγής καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα ασφαλείας. Η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της δομής της φλόγας σε δύο πρότυπους καυστήρες υπό ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης εκτενείς μετρήσεις θερμοκρασίας και χημικών ειδών. Η δομή της εργασίας είναι η εξής: Αρχικά περιγράφεται διεξοδικά η διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης της εργαστηριακής διάταξης και παρατίθεται αναλυτικό εγχειρίδιο λειτουργίας της. Εν συνεχεία περιγράφεται η μετρητική μεθοδολογία και η διαδικασία λήψης μετρήσεων. Τέλος παρουσιάζονται ποιοτική χαρτογράφηση της δομής της φλόγας και ποσοτικές μετρήσεις θερμοκρασιών και χημικών ειδών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς ο σχεδιασμός και η λειτουργία της αναπτυχθείσας εργαστηριακής υποδομής για την μελέτη φαινομένων καύσης σε πρότυπους καυστήρες. Η κάτοψη της εγκατάστασης φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.1. Κάτοψη εγκατάστασης.



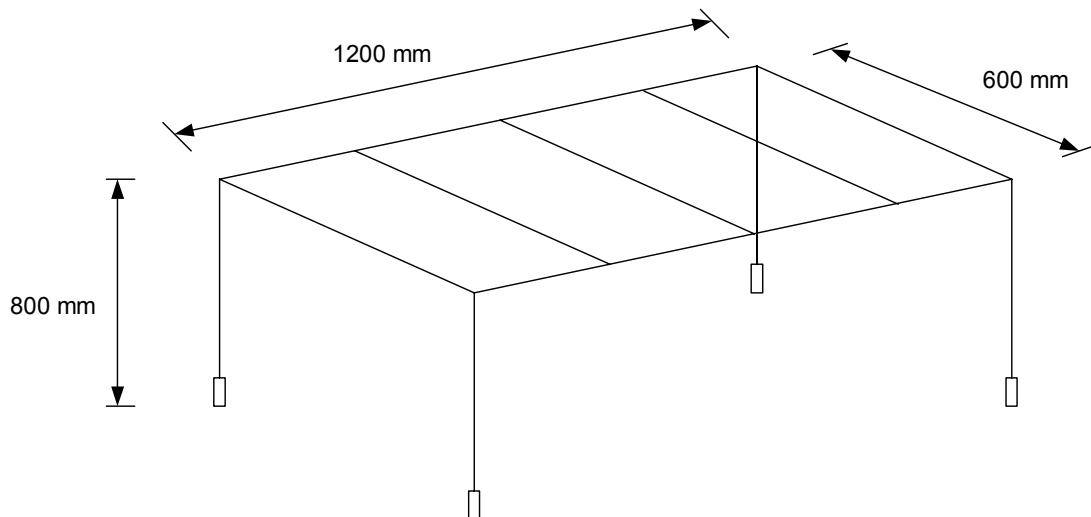
Σχήμα 2.2. Πανοραμική άποψη του εργαστηρίου.

Ο χώρος, στον οποίο έχει στηθεί η εργαστηριακή υποδομή φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Οι επιφάνειες εργασίας 1,2 και 3, είναι τοποθετημένες με τον τρόπο που φαίνεται παραπάνω για τους εξής λόγους: Αφενός για να είναι κοντά στον πίνακα των ροομέτρων και αφετέρου για να βρίσκονται κάτω από τις φούσκες εξαερισμού. Περιμετρικά των επιφανειών εργασίας υπάρχει κενός χώρος, ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση. Η 1^η επιφάνεια φέρει τον πιεστικό καυστήρα αερίου με συστροφή (καυστήρας συστροφής ή *swirl burner*) και την τραβέρσα, ενώ η δεύτερη επιφάνεια φέρει τον πορώδη καυστήρα. Η επιφάνεια εργασίας που φέρει τον Η/Υ, την συσκευή των μονάδων προσαρμογής σήματος και το διαφορικό, είναι τοποθετημένη εκ δεξιών της 1^{ης} επιφάνειας εργασίας και σε κοντινή απόσταση από αυτή, αφενός για χωροταξικούς λόγους και αφετέρου για να είναι εύκολη η σύνδεση του μετρικού μας οργάνου με τον υπολογιστή. Δεξιά του Η/Υ έχουν τοποθετηθεί οι μπουκάλες μεθανίου και προπανίου, έτσι ώστε να μην παρακωλύεται η διαδικασία του πειράματος. Ενδιάμεσα των επιφανειών εργασίας, τοποθετούνται διαχωριστικές επιφάνειες, οι οποίες βοηθούν στην σωστή εκτέλεση του πειράματος.

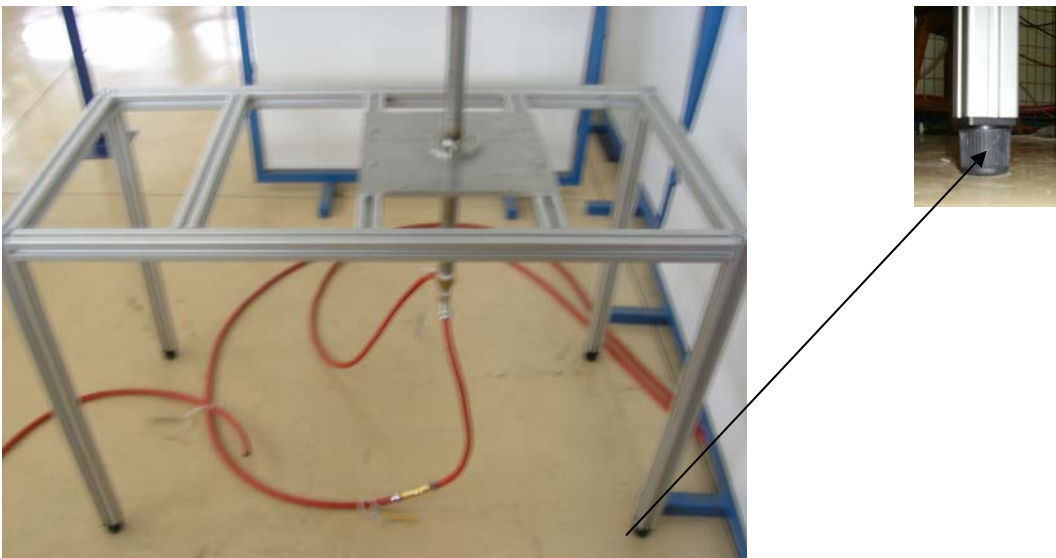
Οι επιφάνειες εργασίας είναι φτιαγμένες από αλουμίνιο, που έχει διαστάσεις 40mm x 40mm. Προμηθευτής ήταν η «ITEM ΕΛΛΑΣ», (www.itemhellas.gr).

Ενδιάμεσα των επιφανειών σε ίσες αποστάσεις των 330mm περίπου είναι εγκάρσια τοποθετημένα κομμάτια αλουμινίου που έχουν σκοπό την δημιουργία υποπλαισίων, πάνω στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν πλάκες. Στην 1^η επιφάνεια εργασίας έχουν τοποθετηθεί δύο σιδερένιες πλάκες. Στην πρώτη πλάκα έχει προσαρτηθεί μία τραβέρσα, ενώ στην δεύτερη πλάκα

είναι προσαρτημένος ο καυστήρας συστροφής. Στην 2^η επιφάνεια εργασίας έχει τοποθετηθεί σιδερένια πλάκα με τον πορώδη καυστήρα. Το τραπέζι στερεώνεται σε βάσεις, οι οποίες έχουν την δυνατότητα της καθ' ύψος ρύθμισης. Άνωθεν της κάθε επιφάνειας εργασίας, υπάρχει η φούσκα του εξαερισμού, (Σχήμα 2.5.).



Σχήμα 2.3. Σχέδιο επιφάνειας εργασίας.

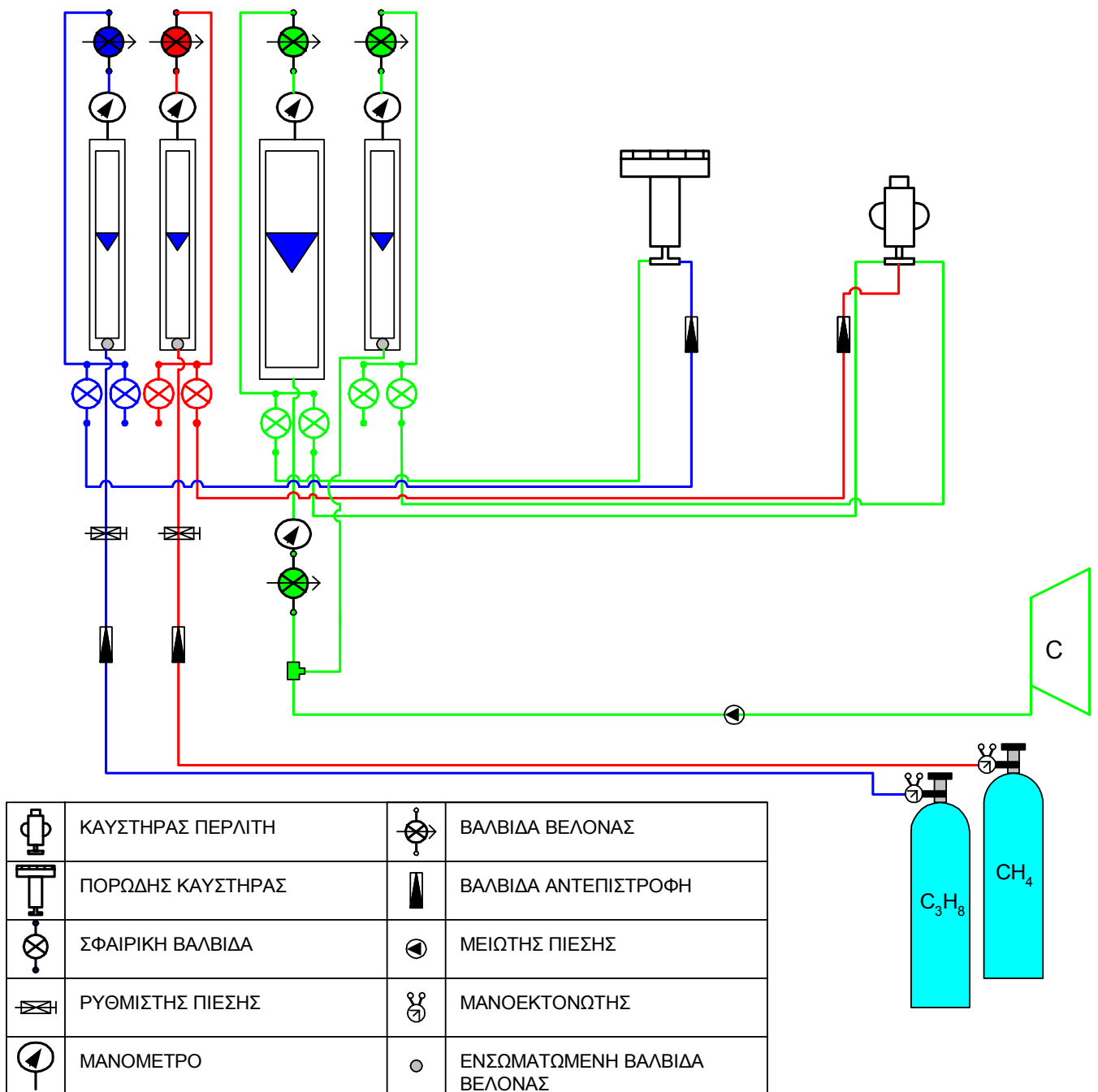


Σχήμα 2.4. Επιφάνεια εργασίας με τις βάσεις στήριξής της.



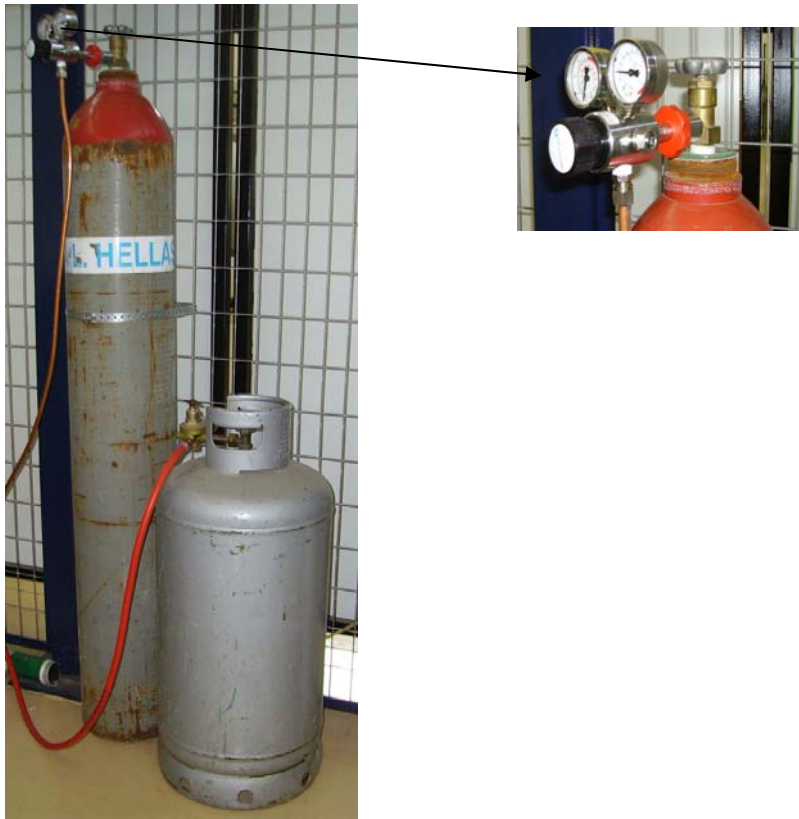
Σχήμα 2.5. Η επιφάνεια εργασίας με την τραβέρσα και την φούσκα εξαερισμού.

2.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ



Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ροής της εργαστηριακής υποδομής.

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα είναι το μεθάνιο CH_4 , το οποίο είναι αποθηκευμένο σε μπουκάλια. Η μπουκάλια έχει προμηθευτεί από την «AIRLIQUIDE ΕΛΛΑΣ», (www.airliquide.gr), έχει μέγιστη χωρητικότητα 50 lit και είναι καθαρότητας 99,995%. Η μπουκάλια συνοδεύεται από έναν μανοεκτονωτή μάρκας AIL 8/15, ο οποίος προμηθεύεται από την ίδια εταιρία. Ο μειωτής έχει μέγιστη πίεση 240 bar και ελάχιστη πίεση 8 bar. Η μπουκάλια έχει αρχική μέγιστη πίεση 200 bar.



Σχήμα 2.7. Μπουκάλα μεθανίου με τον μειωτή.

Το καύσιμο αφού εγκαταλείψει την μπουκάλα, οδηγείται στο ροόμετρο του μεθανίου μέσω των σωλήνων μεταφοράς. Οι σωλήνες μεταφοράς είναι «TUBI SEL ACETYLENE HOSC, 20/60 Bar, Φ(8x15)/DIN 8541». Οι συγκεκριμένοι σωλήνες, και οι ανεπίστροφες βαλβίδες έχουν προμηθευτεί από την εταιρία «PEΠΠΙΑΣ». Τα μανόμετρα των ροομέτρων έχουν προμηθευτεί από την εταιρία «TECHNOPNEUMATIC». Ο αέρας αντίστοιχα από τον συμπιεστή μάρκας «ELEKTRONIKON» καταλήγει στα ροόμετρα του αέρα, αφού πρώτα περάσει από μειωτή.

Ο πίνακας που περιέχει τα ροόμετρα είναι κάθετα τοποθετημένος στην άνω μεριά του συρματοπλέγματος το εργαστηρίου. Αυτό έγινε, αφού τα ροόμετρα πρέπει να είναι κάθετα για να λειτουργήσουν. Στον πίνακα των ροομέτρων, υπάρχουν τέσσερα ροόμετρα στήλης της γερμανικής εταιρίας KROHNE, (www.krohne.com). Ένα ροόμετρο μεθανίου, μοντέλο DK 48 με περιοχή λειτουργίας: 5-50 lit/min, ένα ροόμετρο προπανίου, μοντέλο DK 48 με περιοχή λειτουργίας: 5-50 lit/min και δύο ροόμετρα αέρα. Ένα ροόμετρο υψηλής παροχής, μοντέλο DK 48 με περιοχή λειτουργίας: 35-350 lit/min και ένα ροόμετρο για χαμηλής παροχής, μοντέλο DK 48 με περιοχή λειτουργίας: 6-60 lit/min. Η ελληνική εταιρία που τα προμηθεύει είναι η «AIRLIQUIDE ΕΛΛΑΣ», (www.airliquide.gr). Τα ροόμετρα έχουν βαθμονομηθεί σε πίεση 3 bar και θερμοκρασία 22.5 °C. Η μέγιστη πίεση λειτουργίας τους είναι στα 10 bar, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία τους είναι στους 100 °C.



Σχήμα 2.8. Πίνακας ροομέτρων με τα μανόμετρα και τις σφαιρικές βαλβίδες.

Πάνω από τα ροόμετρα του μεθανίου, προπανίου και αέρα χαμηλής παροχής υπάρχει, μια βαλβίδα βελόνας και ένα μανόμετρο μάρκας FIMET. Η περιοχή λειτουργίας των μανομέτρων είναι: 0-6 bar. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε ένα από τα τρία αυτά ροόμετρα έχουν ενσωματωμένη μια needle βαλβίδα, η οποία είναι ανοιχτή διαρκώς. Κάτω από την κάθε βαλβίδα βελόνας υπάρχει ρυθμιστής πίεσης, που χρησιμεύει για την σταθεροποίηση της πίεσης στην πίεση λειτουργίας των ροομέτρων. Στο ροόμετρο του αέρα υψηλής παροχής υπάρχουν εκατέρωθεν, τμήματα σιδερένιου σωλήνα γεμάτα με καλαμάκια. Τα τμήματα αυτά χρησιμεύουν για την εξομάλυνση της ροής. Στο πάνω μέρος υπάρχει μια βαλβίδα βελόνας και ένα μανόμετρο μάρκας FIMET με περιοχή λειτουργίας: 0-6 bar. Στο κάτω μέρος του ροομέτρου υπάρχει ένας μειωτής μάρκας Kindmen με περιοχή λειτουργίας: 0-12 bar. Στο κάτω μέρος του πίνακα, υπάρχουν οι σφαιρικές βαλβίδες, οι οποίες έχουν σκοπό να διανείμουν το καύσιμο και τον αέρα σε οποιονδήποτε καυστήρα, χωρίς να είναι αναγκαία η μεταφορά του σωλήνα από τον έναν καυστήρα στον άλλο.



Σχήμα 2.9. Σφαιρικές βαλβίδες.

Το μεθάνιο και ο αέρας αφού εγκαταλείψουν τα ροόμετρα, μέσω των σωλήνων μεταφοράς καταλήγουν στον καυστήρα συστροφής. Στα συγκεκριμένα τμήματα των σωλήνων, από τα

ροόμετρα στον καυστήρα, υπάρχουν αντεπίστροφες βαλβίδες για αποφυγή της αναδρομής της φλόγας (flashback). Αντεπίστροφες βαλβίδες υπάρχουν και στα τμήματα των σωληνώσεων από τις μπουκάλες μέχρι τα ροόμετρα.

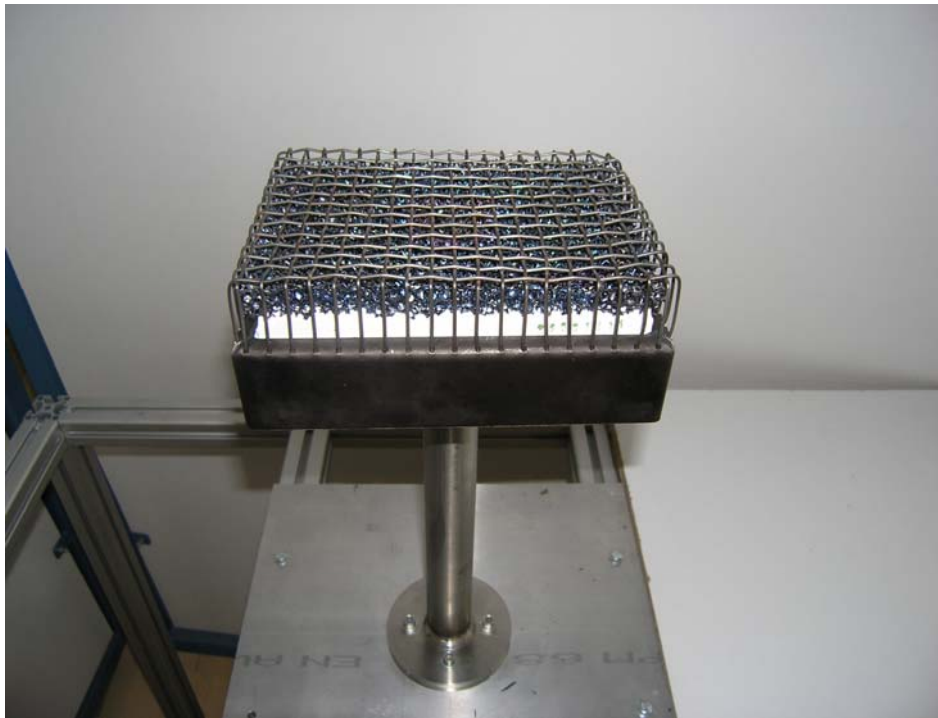
Ο καυστήρας συστροφής έχει στο κάτω μέρος του, σωλήνα υποδοχής του καυσίμου διαμέτρου 10 mm. Το στόμιο του καυστήρα έχει διατομή 27 mm. Ανάντι του καυστήρα υπάρχει φλάντζα με σπείρωμα 60 mm, η οποία δέχεται τον σωλήνα μεταφοράς του αέρα. Στην κατάληξη του σωλήνα υπάρχει διάταξη σχήματος T, στην οποία έχουν προσαρμοσθεί οι σωλήνες του αέρα υψηλής παροχής και χαμηλής παροχής. Ο αέρας αφού ακολουθήσει την κυκλική διαδρομή μέσω των δύο ημικυκλίων, αναμειγνύεται με το καύσιμο που έρχεται από τον αντίστοιχο σωλήνα υποδοχής. Έτσι δημιουργείται το μείγμα, που οδηγεί σε φλόγα με την ύπαρξη στιγμιαίας φωτιάς.

Το ίδιο διάγραμμα ροής ακολουθείται και στην περίπτωση που αντί για μεθάνιο, το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το προπάνιο. Στην παρούσα φάση ο σωλήνας προπανίου είναι συνδεδεμένος με τον *πορώδη καυστήρα*.

Ο *πορώδης καυστήρας* εισάγει προαναμεμειγμένο μείγμα προπανίου – αέρα από σωλήνα διαμέτρου 33 mm. Στο κάτω μέρος του υπάρχει διάταξη T, πάνω στην οποία προσαρμόζονται οι σωλήνες του αέρα υψηλής παροχής και του προπανίου. Στο πάνω μέρος φέρει φλάντζα ανοξείδωτη διαμέτρου 77 mm. Το μεταλλικό πλαίσιο έχει διαστάσεις 150 mm x 195 mm και το ύψος του είναι 45 mm. Πάνω από το κέλυφος υπάρχει κεραμικό πορώδες υλικό από τριοξείδιο του αργιλίου και μία αφρώδης δομή καρβιδίων του πυριτίου. Το πορώδες υλικό και η αφρώδης δομή περιβάλλεται από ανοξείδωτο μεταλλικό πλέγμα.



Σχήμα 2.10. Πιεστικός καυστήρας αερίου με συστροφή (καυστήρας συστροφής ή swirl burner).



Σχήμα 2.11. Πορώδης καυστήρας.

2.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για την λειτουργία της εγκατάστασης πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

2.2.1. ΕΝΑΡΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

1. Ανοίγουμε τον συμπιεστή αέρα, ο οποίος βρίσκεται στο υπόγειο του κτηρίου Ο. Η έναρξη λειτουργίας πραγματοποιείται με το πάτημα του πράσινου κουμπιού.



Σχήμα 2.12. Ο συμπιεστής του αέρα ανοιχτός.

2. Στρέφουμε την πράσινη βάνα του αέρα προς τα δεξιά, φέρνοντας το χερούλι στην οριζόντια θέση και ρυθμίζουμε τον μειωτή που βρίσκεται δίπλα της στα 6 bar.

3. Ανοίγουμε τον εξαερισμό. Αυτό πραγματοποιείται κουνώντας το αριστερό κουμπί προς τα πάνω. Εμφανίζεται στην οθόνη ένας αριθμός. Η ρύθμιση του εξαερισμού γίνεται με την περιστροφή του δεξιού κουμπιού στην ένδειξη που επιθυμούμε.
4. Ανοίγουμε την στρόφιγγα της μπουκάλας μέχρι να δείξει το αριστερό μανόμετρο την πίεση της μπουκάλας.
5. Ανοίγουμε τους διανομείς του αέρα και του μεθανίου. Αυτό πραγματοποιείται, φέρνοντας τα κατάλληλα χερούλια στην κατακόρυφη θέση (στην συγκεκριμένη περίπτωση τα δεξιά χερούλια των διανομέων).
6. Στρέφοντας αριστερά την βαλβίδα βελόνας του ροομέτρου αέρα υψηλής παροχής ή αντίστοιχα αριστερά την βαλβίδα βελόνας του ροομέτρου αέρα χαμηλής παροχής (ανάλογα με την παροχή που θέλουμε, επιλέγουμε και το κατάλληλο ροόμετρο αέρα), αυξομειώνουμε την παροχή και την ρυθμίζουμε στην ένδειξη που επιθυμούμε.
7. Στρέφουμε αριστερά την βαλβίδα βελόνας του ροομέτρου μεθανίου και ρυθμίζουμε στην ένδειξη που επιθυμούμε.
8. Αφού έχουμε ρυθμίσει κατάλληλα τις παροχές που επιθυμούμε, γρήγορα τοποθετούμε τον αναπτήρα αναμμένο κοντά στον καυστήρα με σκοπό την ύπαρξη της επιθυμητής φλόγας.
9. Αφού υπάρξει φλόγα, κάνουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις στα δύο ροόμετρα, ώστε να σιγουρευτούμε για τις παροχές που επιθυμούμε.
10. Εκτελούμε το πείραμα.

2.2.2. ΛΗΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

- 1) Κλείνουμε την στρόφιγγα της μπουκάλας μεθανίου. Αυτό πραγματοποιείται με την δεξιόστροφη περιστροφή της στρόφιγγας.
- 2) Μειώνουμε σιγά – σιγά, μέσω της βαλβίδας βελόνας, την παροχή στο ροόμετρο του αέρα.
- 3) Το ίδιο κάνουμε και για το ροόμετρο του μεθανίου.

- 4) Αφού κλείσουμε το ροόμετρο του αέρα τελείως (δεν γυρνάει άλλο η βαλβίδα δεξιά), ανοίγουμε τελείως την παροχή στο ροόμετρο του μεθανίου, ώστε να καεί και το υπόλοιπο μεθάνιο που υπάρχει στο δίκτυο.
- 5) Αφού σβήσει ο καυστήρας κλείνουμε όλα τα ροόμετρα και όλους προς διανομείς. Αυτό σημαίνει ότι τα χερούλια των διανομέων βρίσκονται στην οριζόντια θέση.
- 6) Κλείνουμε τον εξαερισμό κουνώντας το δεξί κουμπί προς τα κάτω, μέχρι να εμφανιστεί η ένδειξη **OFF**.
- 7) Κλείνουμε την πράσινη βάνα του αέρα, φέρνοντας το χερούλι στην κατακόρυφη θέση.
- 8) Κλείνουμε τον συμπιεστή αέρα, πατώντας το κόκκινο κουμπί.



Σχήμα 2.13. Ο συμπιεστής του αέρα κλειστός.

- 9) Το πείραμα έχει ολοκληρωθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργαστηριακή υποδομή σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με σκοπό την μέτρηση θερμοκρασιών και χημικών ειδών σε δύο πρότυπους καυστήρες. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση των:

1. Θερμοστοιχείων τύπου K (μέτρηση θερμοκρασιών στον καυστήρα συστροφής).
2. Θερμοκάμερας (μέτρηση θερμοκρασιών στον πορώδη καυστήρα).
3. Αναλυτή καυσαερίων (μετρήσεις χημικών ειδών [NO_x, CO κ.λ.π.] στον καυστήρα συστροφής).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά, οι αρχές και η λειτουργία των παραπάνω οργάνων.

3.1. ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

3.1.1. ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΥΠΟΥ K

Τα θερμοστοιχεία μετρούν τη θερμοκρασία εκμεταλλευόμενα το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο όταν δύο διαφορετικά μέταλλα βρίσκονται σε επαφή, το σημείο επαφής παράγει μικρή τάση το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την κοινή θερμοκρασία των θερμοστοιχείων στο σημείο επαφής [2].

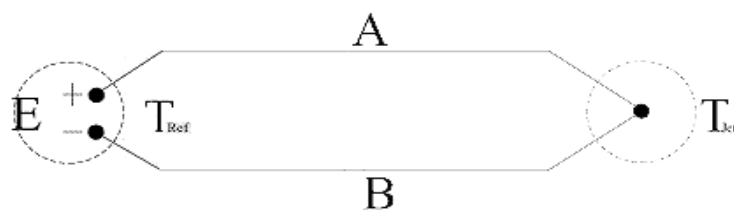
Η θερμοηλεκτρική τάση συναρτήσει της θερμοκρασίας δίδεται από τη σχέση:

$$E(S) = S(T) \cdot T, \text{ όπου}$$

E : η θερμοηλεκτρική τάση,

T : η θερμοκρασία,

S : συντελεστής Seebeck (εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ζεύγος των μεταλλικών αγωγών).



Σχήμα 3.1. Αρχή λειτουργίας θερμοστοιχείου



Σχήμα 3.2. Χρησιμοποιούμενο θερμοστοιχείο τύπου K .

Υπάρχουν αρκετοί τύποι θερμοστοιχείων ανάλογα με τα υλικά του ζεύγους των αγωγών. Το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση είναι θερμοστοιχείο τύπου **K**: τα υλικά του θετικού πόλου είναι 90% Ni- 10% Cr, ενώ τα υλικά του αρνητικού πόλου είναι 95% Ni- 2% Al- 2% Mn. Τα θερμοστοιχεία τύπου K προτιμώνται αφού εκτός των άλλων, η συμπεριφορά τους προσεγγίζει τη γραμμική περισσότερο από κάθε άλλο τύπο θερμοστοιχείου. Το εύρος λειτουργίας των συγκεκριμένων θερμοστοιχείων είναι από -50 έως 1350 °C και έχουν προμηθευτεί από την εταιρία «UTEKO», (www.uteco.gr).

Για κάθε τύπο θερμοστοιχείου, η συνάρτηση E δίνεται είτε με τη μορφή πίνακα είτε με τη μορφή πολυωνύμου με μικρό σφάλμα. Για θερμοστοιχεία τύπου K η συνάρτηση E δίνεται με τη μορφή πολυωνύμου:

$$E = c_0 + c_1 T^1 + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5 + c_6 T^6 + c_7 T^7 + c_8 T^8 + 125e^{(-0.5((T-127)/65)^2)} * 10^{-3}, \text{ όπου}$$

$$c_0 = -18.533063273$$

$$c_1 = 38.918344612$$

$$c_2 = 1.6645154356 \text{ E-}2$$

$$c_3 = -7.8702374448 \text{ E-}5$$

$$c_4 = 2.2835785557 \text{ E-}7$$

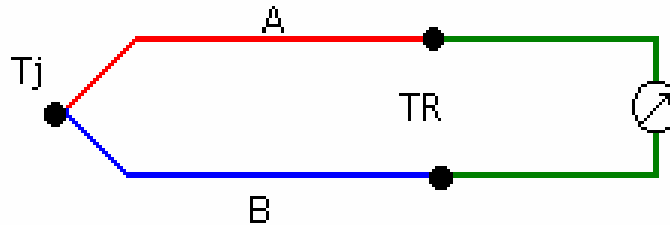
$$c_5 = -3.5700231258 \text{ E-}10$$

$$c_6 = 2.9932909136 \text{ E-}13$$

$$c_7 = -1.2849848798 \text{ E-}16$$

$$c_8 = 2.22399743367 \text{ E-}20$$

Επομένως για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αρκεί να μετρήσουμε την τάση στους ακροδέκτες του θερμοστοιχείου. Είναι λοιπόν απαραίτητη η σύνδεση του θερμοστοιχείου με κάποιο μετρητικό σύστημα. Κατά τη σύνδεση όμως αυτή δημιουργούνται δύο επιπλέον θερμοηλεκτρικές τάσεις όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.3. Σύνδεση θερμοστοιχείου με μετρητικό σύστημα.

Η μετρούμενη τάση E είναι άθροισμα των τριών θερμοηλεκτρικών τάσεων:

$$V_{ABT_j} + V_{BΓTR} + V_{ΓATR} = E$$

Στην περίπτωση που $TR=T_j$, προκύπτει από τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο:

$$V_{ABTR} + V_{BΓTR} + V_{ΓATR} = 0, \text{ επομένως προκύπτει:}$$

$$V_{ABT_j} + V_{ABTR} = E$$

Από την τελευταία εξίσωση φαίνεται ότι η σύνδεση του θερμοστοιχείου με τη μετρητική συσκευή οδηγεί στην ανάπτυξη μιας παρασιτικής τάσης V_{ABTR} , η οποία αντιστοιχεί στην καθαρή τάση που θα παρήγαγε το θερμοστοιχείο αν η επαφή AB βρισκόταν υπό θερμοκρασία TR . Η μονάδα περιλαμβάνει ένα τρανζίστορ πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές της θερμοκρασίας που αντισταθμίζει την παρασιτική τάση των συνδέσεων παράγοντας μια τάση ίση με αυτήν αλλά αντίθετης πολικότητας.

Οι τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις με το θερμοστοιχείο, μεταφέρονται στον Η/Υ μέσω της συσκευής που περιέχει τις μονάδες προσαρμογής σήματος 5B37 και αποθηκεύονται σε αρχεία δεδομένων, μέσω του προγράμματος Labview και είναι διαθέσιμα για περαιτέρω επεξεργασία.

Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιείται με την βοήθεια της *τραβέρσας*. Η τραβέρσα αποτελεί ένα σημαντικό εξάρτημα της εργαστηριακής υποδομής, διότι πάνω της προσαρμόζεται το θερμοστοιχείο που χρησιμοποιήσαμε και το πιστόλι του αναλυτή καυσαερίων:



Σχήμα 3.4. Η τραβέρσα με τα εξαρτήματά της.

Η τραβέρσα από την μία της μεριά φέρει μια σιδερένια προεξοχή σχήματος Z, πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί το θερμοστοιχείο. Το θερμοστοιχείο είναι σταθερά τοποθετημένο στην παραπάνω προεξοχή. Στην προεξοχή έχει κατάλληλα προσαρμοσθεί και ένα στέλεχος, το οποίο έχει την δυνατότητα της ρύθμισης καθ' ύψος. Πάνω στο στέλεχος είναι τοποθετημένη η ξύλινη βάση που υποδέχεται το πιστόλι του αναλυτή καυσαερίων.

Στην βάση της τραβέρσας είναι τοποθετημένοι κάθετα δύο μοχλοί, οι οποίοι περιστρέφονται κυκλικά. Οι μοχλοί αυτοί είναι βαθμονομημένοι και κάθε πλήρης περιστροφή του μοχλού, αντιστοιχεί σε οριζόντια μετακίνηση του άξονα κατά 4mm. Η διακριτική ικανότητα των μοχλών στους άξονες X,Y (οριζόντιοι άξονες) είναι 0.1 mm, ενώ στον Z άξονα (κατακόρυφος άξονας) είναι 1 mm. Με την περιστροφή των μοχλών η τραβέρσα και συνεπώς η προεξοχή που φέρει το θερμοστοιχείο και το πιστόλι του αναλυτή, μπορούν να κινηθούν σε δύο οριζόντιους άξονες, οι οποίοι είναι κάθετοι μεταξύ τους. Η κίνηση στον κατακόρυφο άξονα εξασφαλίζεται με έναν κυκλικό μοχλό που βρίσκεται στην κορυφή του στύλου της τραβέρσας. Η κυκλική περιστροφή του μοχλού συνεπάγεται και την κατακόρυφη κίνηση της προεξοχής της τραβέρσας. Στην τραβέρσα έχει προσαρτηθεί επίσης ένας βαθμονομημένος χάρακας του ενός μέτρου, με σκοπό την μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης του θερμοστοιχείου.

Η τραβέρσα είναι τοποθετημένη πάνω σε μία πλάκα. Η εν λόγω πλάκα στερεώνεται πάνω στην σιδερένια πλάκα με την βοήθεια βιδών.

Είναι γνωστό ότι το θερμοστοιχείο παράγει ηλεκτρική τάση, η οποία πρέπει να μετατραπεί σε θερμοκρασία. Για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλου λογισμικού.

Με την βοήθεια του λογισμικού λαμβάνονται οι τιμές από την κάρτα συλλογής δεδομένων και την σειριακή θύρα και γίνεται επεξεργασία τους, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η αποθήκευσή τους σε αρχείο για μετέπειτα ανάλυση. Το περιβάλλον προγραμματισμού που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι το LABVIEW, το οποίο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στην ανάπτυξη προγραμμάτων για μετρητικά συστήματα [2].

Το LABVIEW είναι ένα περιβάλλον προγραμματισμού όπως η C ή η BASIC που όμως διαφέρει από αυτές σε ένα σημαντικό στοιχείο. Τα άλλα προγραμματιστικά συστήματα χρησιμοποιούν γλώσσες κειμένου για να δημιουργήσουν κώδικα, ενώ το LABVIEW χρησιμοποιεί μία γραφική γλώσσα προγραμματισμού, τη G, για την δημιουργία προγραμμάτων με την μορφή διαγράμματος.

Το LABVIEW όπως η C ή η BASIC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη προγραμμάτων γενικού σκοπού καθώς περιέχει εκτεταμένες βιβλιοθήκες με υπορουτίνες για κάθε είδους προγράμματα. Οι βιβλιοθήκες του LABVIEW περιλαμβάνουν εργαλεία για την συλλογή δεδομένων (data acquisition) και την παρουσίαση και αποθήκευσή τους. Επίσης περιέχει όλα τα συμβατικά προγραμματιστικά εργαλεία όπως breakpoints, οπτικοποίηση της εκτέλεσης ώστε να φαίνεται πως τα δεδομένα διακινούνται μέσα στο πρόγραμμα, καθώς και δυνατότητα εκτέλεσης του προγράμματος σε βήματα που κάνουν το debugging και την ανάπτυξη προγραμμάτων ευκολότερα.

Το πρόγραμμα LABVIEW είναι ένα πρόγραμμα βασισμένο στην γλώσσα προγραμματισμού G. Εν συνεχεία θα περιγραφούν τα βασικά στοιχεία της G που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της λειτουργίας της εφαρμογής του θερμοστοιχείου.

Ένα βασικό στοιχείο αποτελούν τα *VI*s (*Virtual instruments*), τα οποία αποτελούνται από τρία μέρη: τον πίνακα ελέγχου, το διάγραμμα ροής δεδομένων και το εικονίδιο με τις συνδέσεις του. Ο πίνακας ελέγχου είναι η οθόνη μέσω της οποίας ο χρήστης επικοινωνεί με το πρόγραμμα. Το διάγραμμα ροής δεδομένων αποτελεί τον εκτελέσιμο κώδικα. Το εικονίδιο με τις συνδέσεις του επιτρέπει τη χρησιμοποίηση του VI εντός άλλου VI ως subVI.

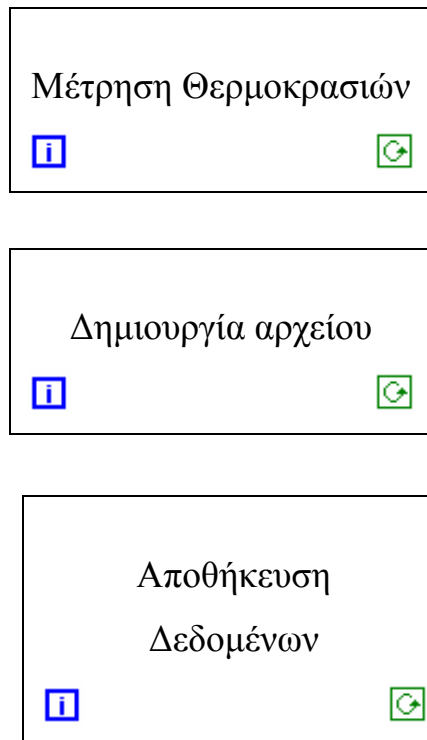
Ένα άλλο βασικό στοιχείο είναι οι επαναληπτικοί βρόχοι και τα διαγράμματα. Η G έχει δύο ειδών δομές με τις οποίες επιτυγχάνει την επαναληπτική εκτέλεση ενός τμήματος κώδικα. Τον βρόχο While (While Loop) και τον βρόχο For (For Loop). Και οι δύο δομές παριστάνονται στο Block diagram με κουτιά μεταβλητού μεγέθους. Το τμήμα του διαγράμματος προς επανάληψη τοποθετείται στο εσωτερικό του κουτιού. Το While Loop εκτελείται όσο η συνθήκη εκτέλεσης του βρόχου έχει την τιμή TRUE. Το For Loop εκτελεί ένα καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Τα διαγράμματα (charts) χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση δεδομένων στην οθόνη σε πραγματικό χρόνο.

Ένα τρίτο βασικό στοιχείο είναι οι δομές *Case* και *Sequence*. Η δομή *Sequence* είναι μια δομή εκτέλεσης εντολών κατά συνθήκη που είναι αρκετά όμοια της εντολής If Else των συμβατικών

γλωσσών προγραμματισμού. Η δομή Sequence δίνει την δυνατότητα στον προγραμματιστή να εκτελέσει διάφορες εντολές με αυστηρά καθορισμένη σειρά. Αυτό είναι ένα σημαντικό εργαλείο με δεδομένο ότι στην G το πρόγραμμα έχει διαγραμματική μορφή και πολλές φορές η σειρά εκτέλεσης των εντολών δεν είναι σαφώς ορισμένη, όπως στις γλώσσες που ο κώδικας είναι γραμμένος σε μορφή κειμένου και οι εντολές εκτελούνται στην σειρά που έχουν γραφτεί.


Τέταρτο βασικό στοιχείο είναι οι πίνακες (*matrices*), τα διανύσματα (*arrays*), οι ομάδες (*clusters*) και τα γραφήματα (*Graphs*). Οι πίνακες και τα διανύσματα είναι ομάδες δεδομένων ίδιου τύπου, ενώ τα clusters μπορεί να περιέχουν ομάδες δεδομένων διαφορετικού τύπου. Τα γραφήματα χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση στην οθόνη σειράς δεδομένων.

Το βασικό VI αποτελείται από 3 While Loops. Το καθένα εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία. Το πρώτο επικοινωνεί με την κάρτα συλλογής δεδομένων, διαβάζει τα σήματα από τα θερμοστοιχεία και υπολογίζει τις θερμοκρασίες. Οι δύο τελευταίες υπορουτίνες χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο.



Σχήμα 3.5.


Ο λόγος που οι διαφορετικές υπορουτίνες εκτελούνται σε διαφορετικά While Loops είναι ότι η καθεμία εκτελείται με διαφορετική ταχύτητα. Αν όλες οι υπορουτίνες εκτελούνταν μαζί, η πιο αργή θα επέβαλε της ταχύτητά της στις υπόλοιπες. Με την τοποθέτησή τους σε διαφορετικά While Loops μπορούν να εκτελούνται όλες μαζί με διαφορετική όμως ταχύτητα.

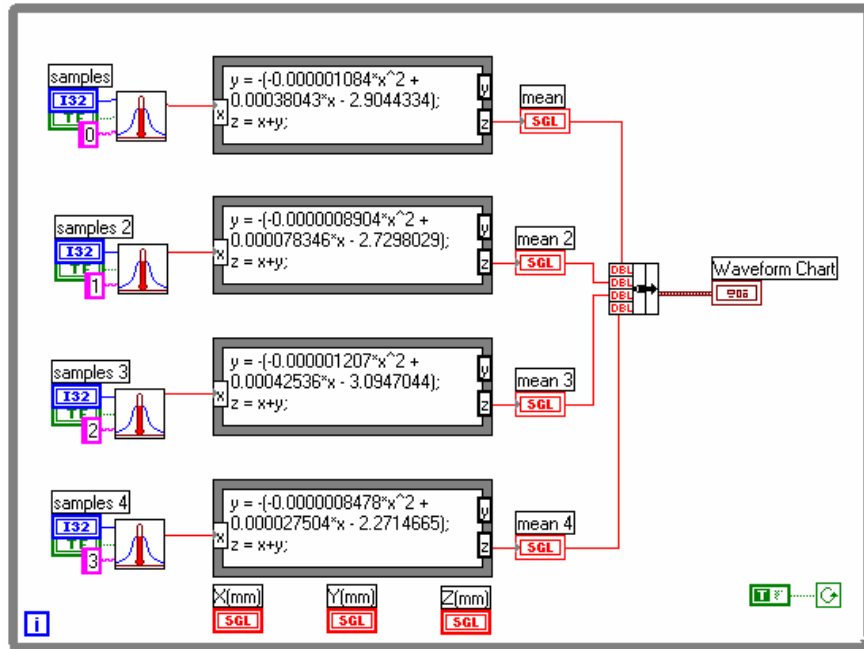
Η υπορουτίνα για την μέτρηση των θερμοκρασιών εκτελεί ταυτόχρονα τέσσερα subVIs thermostat () . Τα συγκεκριμένα subVIs υπολογίζουν το καθένα την θερμοκρασία ενός

θερμοστοιχείου. Ύστερα ακολουθεί σε καθένα από αυτά το πολυώνυμο

$$\begin{cases} y = \{-0.000001084*x^2 + \\ 0.00038043*x - 2.9044334\}; \\ z = x+y; \end{cases}$$


που υπολογίζει το σφάλμα των μετρήσεων. Οι τέσσερις




θερμοκρασίες ομαδοποιούνται σε ένα cluster () και από εκεί στο front panel όπου απεικονίζονται γραφικά.



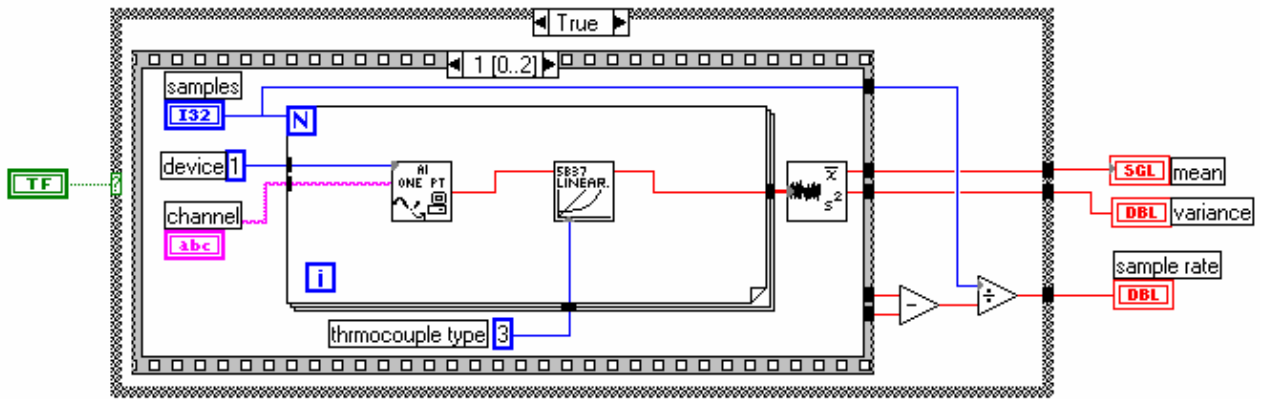
Σχήμα 3.6.

Τα subVI thermostat (Σχήμα 3.7.) αποτελείται από μία δομή Case. Ο χρήστης μπορεί από το κατάλληλο κουμπί ελέγχου στο front panel να θέτει την συνθήκη εκτέλεσης της Case σε True ή False και ανάλογα να υπολογίζεται η θερμοκρασία ενός θερμοστοιχείου ή όχι. Ως εισόδους δέχεται






τον αριθμό των δειγμάτων () που θα χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό της μέσης


θερμοκρασίας κάποια χρονική στιγμή και τον αριθμό του καναλιού (), στο οποίο είναι συνδεδεμένο το θερμοστοιχείο, του οποίου τη θερμοκρασία θα μετρήσουμε. Το VI υπολογίζει τρία μεγέθη: τη μέση τιμή της θερμοκρασίας (), την τυπική απόκλιση () και τον ρυθμό δειγματοληψίας στο κανάλι.

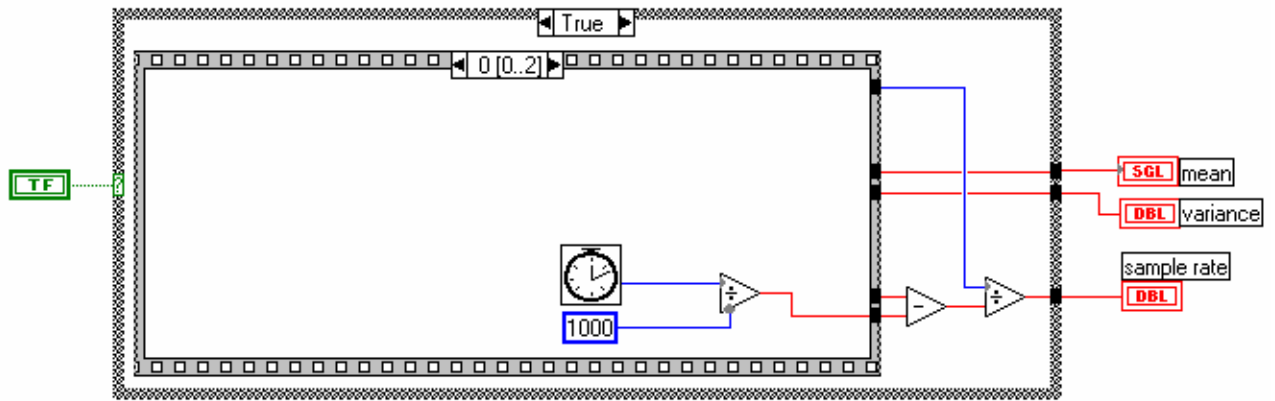
Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται στο εσωτερικό μίας δομής Sequence με τρία διαδοχικά βήματα 0,1 και 2. Η θερμοκρασία υπολογίζεται στο βήμα 1. (Σχήμα 3.7.)



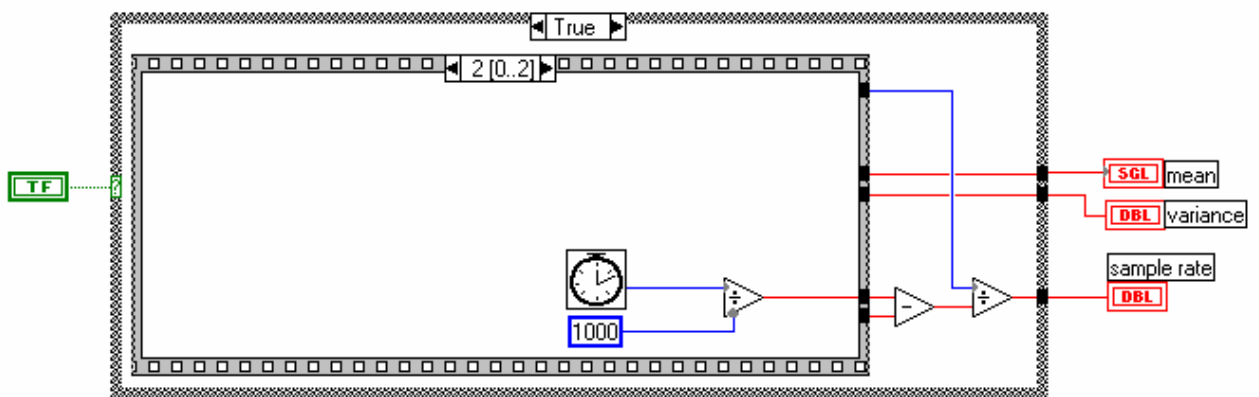
Σχήμα. 3.7.

Ο βρόχος For εκτελείται N φορές, όπως ορίζει ο χρήστης μέσω της μεταβλητής (). Το subVI  (AI Sample Channel VI) ανοίγει το κανάλι που έχουμε ορίσει και διαβάζει μία τιμή τάσης. Στην συνέχεια στέλνει την τιμή αυτή στο subVI  , το οποίο μετατρέπει την τάση σε θερμοκρασία ανάλογα με τον τύπο του θερμοστοιχείου (). Τα N το πλήθος αποτελέσματα εισάγονται στην υπορουτίνα που υπολογίζει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση ().

Τα βήματα 0 και 2 της δομής Sequence (Σχήμα 3.8. και 3.9.) υπολογίζουν την ταχύτητα δειγματοληψίας στο συγκεκριμένο κανάλι της κάρτας συλλογής δεδομένων. Στο βήμα 0 η υπορουτίνα Tick Count () αποθηκεύει την χρονική στιγμή που ξεκινάει η δειγματοληψία και στο βήμα 2 η ίδια υπορουτίνα αποθηκεύει την χρονική στιγμή που η δειγματοληψία ολοκληρώνεται. Διαιρώντας τον αριθμό των δειγμάτων με την διαφορά των δύο χρονικών στιγμών προκύπτει η ταχύτητα δειγματοληψίας.





Σχήμα 3.8.



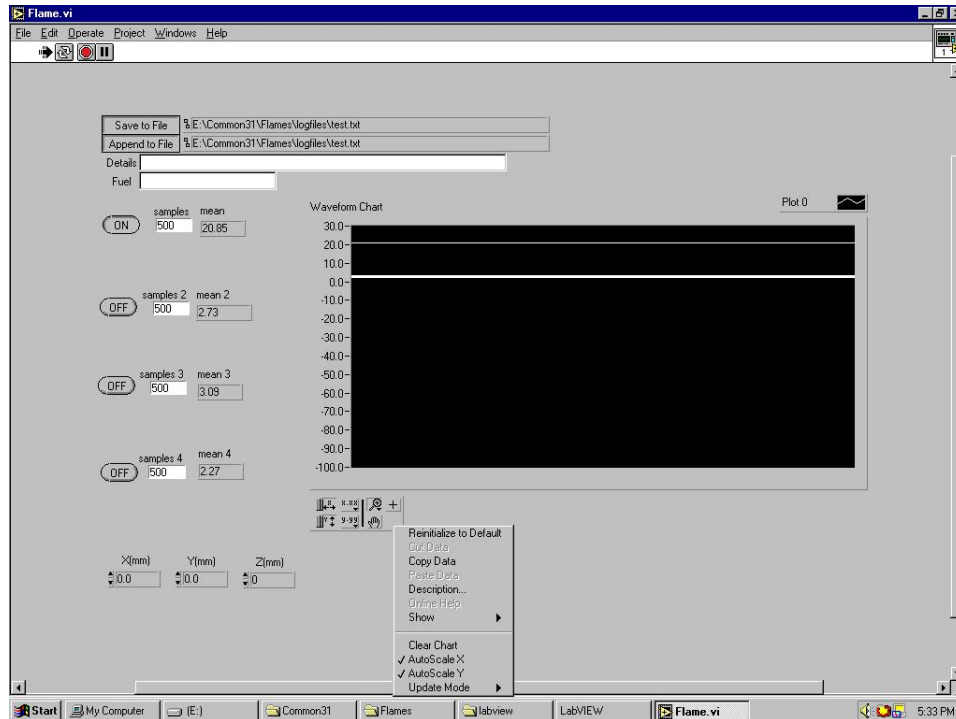
Σχήμα 3.9.

Για την αποθήκευση των δεδομένων σε αρχείο χρησιμοποιούνται δύο υπορουτίνες. Η μία δημιουργεί ένα καινούργιο αρχείο αποθηκεύει μία πρώτη σειρά δεδομένων και η άλλη προσθέτει δεδομένα σε ένα υπάρχον αρχείο (Σχήμα 3.10. και 3.11.)

Στην αρχή κάθε αρχείου το subVI filestring () αποθηκεύει στο αρχείο κάποιες βασικές πληροφορίες όπως ημερομηνία, ώρα και κάποιες λεπτομέρειες σχετικά με τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Τα δεδομένα που αποθηκεύουν οι δύο υπορουτίνες είναι οι θερμοκρασίες στους άξονες X,Y,Z. Η δομή των δύο υπορουτινών είναι ίδια με την διαφορά ότι η μία υπορουτίνα

χρησιμοποιεί το subVI Characters To File () που αποθηκεύει τις αρχικές πληροφορίες στο αρχείο. Εντός της δομής While όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.10. και 3.11. υπάρχει μία δομή Case, της οποίας τη συνθήκη ελέγχει ο χρήστης από την οθόνη λειτουργίας. Όταν η συνθήκη πάρει την τιμή True, οι τιμές των μεγεθών που έχουν υπολογισθεί, αποθηκεύονται στο αρχείο που έχει ορίσει ο χρήστης.

χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας είναι μεγάλοι, οι τιμές αυτές δημιουργούν μία κυματοειδή γραμμή. Κάτωθεν του κυματοειδούς διαγράμματος υπάρχουν παράμετροι που ορίζονται από τον χρήστη. Το κάτω τμήμα είναι αφιερωμένο σε ενδείξεις σχετικές με την απόσταση (σε mm) που διανύει το θερμοστοιχείο στους τρεις άξονες X,Y,Z.



Σχήμα 3.12. Η οθόνη λειτουργίας του προγράμματος Labview.

Η διαδικασία για την λήψη μετρήσεων και αποθήκευση τους σε αρχεία είναι η εξής:

- Πατάμε το άσπρο βέλος στο πάνω αριστερό μέρος της οθόνης.
- Πατάμε την πρώτη από τις τέσσερις ενδείξεις OFF μέχρι να γίνει ON. Οι άλλες τρεις ενδείξεις μένουν στην ένδειξη OFF. Αυτό συμβαίνει γιατί η πρώτη ένδειξη αντιστοιχεί στην πρώτη θύρα της μονάδας προσαρμογής σήματος 5B37 όπου είναι τοποθετημένο το θερμοστοιχείο τύπου K του πειράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τέσσερις πρώτες θύρες της μονάδας υποδέχονται θερμοστοιχεία τύπου K.
- Αμέσως στο γκρι κουτί **means** εμφανίζεται η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ που μετράει το θερμοστοιχείο κάθε στιγμή, καθώς και μια άσπρη γραμμή στο **Waveform Chart**.
- Έχοντας τοποθετήσει τον κέρσορα στο κενό κάτω από τον σταυρό, στο κουτί κάτω από το μαύρο πάνελ, και κάνοντας δεξί κλικ στο ποντίκι βγαίνει το παράθυρο που φαίνεται παρακάτω. Κλικάροντας την ένδειξη **Autoscale Y**, ο κατακόρυφος άξονας στο μαύρο πάνελ προσαρμόζεται και δείχνει την εκάστοτε θερμοκρασία που μετράει το θερμοστοιχείο.

- Στο συγκεκριμένο πείραμα, λόγω της μετακίνησης του θερμοστοιχείου στους τρεις άξονες X,Y,Z, έχουν τοποθετηθεί στο κάτω αριστερό μέρος της οθόνης τρεις ενδείξεις. Όταν μετακινείται το θερμοστοιχείο στο X άξονα για παράδειγμα 5mm, τότε γράφουμε στο κουτί κάτω από την ένδειξη X (mm) τον αριθμό 5.0. Η ίδια ακριβώς διαδικασία συμβαίνει όταν μετακινούμαστε στους άλλους δύο άξονες.

Η διαδικασία αποθήκευσης μίας μέτρησης ή ενός σετ μετρήσεων είναι η εξής:

- Στο κουτί δίπλα από το **Save File** και μετά από την λέξη test γράφουμε το όνομα του αρχείου που θέλουμε να αποθηκεύσουμε, για παράδειγμα test 12-10-07.txt.
- Το ίδιο ακριβώς όνομα γράφουμε στο από κάτω κουτί με την ίδια σειρά, αλλιώς δεν αποθηκεύεται η μέτρηση.
- Όταν τρέχει το πρόγραμμα και είμαστε έτοιμοι να σώσουμε την μέτρηση, πατάμε την ένδειξη **Save File**. Αμέσως δημιουργείται αρχείο με το όνομα 12-10-07 στο αρχείο **logfiles**. Πατώντας αμέσως μετά την ένδειξη **Append to File**, αναγράφεται στο αρχείο 12-10-07 η τιμή της θερμοκρασίας που υπάρχει στο γκρι κουτί **means**.
- Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, καταγράφουμε όσες τιμές επιθυμούμε στο αρχείο 12-10-07.
- Αν θελήσουμε να αποθηκεύσουμε τιμές σε άλλο αρχείο, απλά αλλάζουμε το όνομα του αρχείου (για παράδειγμα από 12-10-07 το αλλάζουμε σε 13-10-07).
- Όλα αυτά τα αρχεία τα βρίσκουμε ανατρέχοντας στο βήμα 5 και πατώντας τον φάκελο **logfiles**. Τα αρχεία αυτά είναι σε μορφή **Notepad**. Οι τιμές του κάθε αρχείου μπορούν να μεταφερθούν σε αρχείο **MS Excel** για περαιτέρω χρήση και επεξεργασία.
- Στην περίπτωση που επιθυμούμε να κλείσουμε το πρόγραμμα, πατάμε το κόκκινο κουμπί στο πάνω μέρος της οθόνης. Ύστερα πατάμε την ένδειξη **X** δεξί πάνω άκρο του προγράμματος. Έτσι βγαίνουμε από το πρόγραμμα.

3.1.2. ΘΕΡΜΟΚΑΜΕΡΑ ThermaCAM PM595

Η υπέρυθη κάμερα (θερμοκάμερα) είναι μια συσκευή που σχηματίζει εικόνα χρησιμοποιώντας υπέρυθη ακτινοβολία και είναι παρεμφερής με την κοινή κάμερα, η οποία σχηματίζει εικόνα χρησιμοποιώντας ορατή ακτινοβολία. Αντί της περιοχής των 450 – 750 νανομέτρων της κάμερας ορατούς ακτινοβολίας, οι υπέρυθρες κάμερες λειτουργούν σε μήκη κύματος της τάξεως των 14,000 nm (14μm) [3].

Η υπέρυθη ενέργεια είναι ένα μόνο μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπου αποσπά ακτινοβολία από τις ακτίνες γάμμα, ακτίνες – x, από μια λεπτή περιοχή της ορατής ακτινοβολίας,

από την υπέρυθη, τα ραντάρ και τα κύματα της τηλεόρασης και του ραδιοφώνου. Όλα αυτά σχετίζονται και διαφοροποιούνται ανάλογα με το μήκος κύματός τους. Όλα τα αντικείμενα εκπέμπουν ένα συγκεκριμένο ποσό ακτινοβολίας μέλανος – σώματος ως συνάρτηση των θερμοκρασιών που έχουν. Γενικά, όσο μεγαλύτερη θερμοκρασία έχει ένα αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη υπέρυθη ακτινοβολία, όπως η ακτινοβολία μέλανος σώματος, εκπέμπει. Μία πολύ καλή κάμερα μπορεί να ανιχνεύσει αυτή την ακτινοβολία με τον ίδιο τρόπο που το κάνει και μια συνηθισμένη κάμερα με την ορατή ακτινοβολία. Λειτουργεί ακόμα και στο απόλυτο σκοτάδι, αφού το επίπεδο του υπάρχοντος φωτός δεν παίζει κανέναν ρόλο. Αυτό την κάνει χρήσιμη για περιπτώσεις διάσωσης σε κτήρια που έχουν γεμίσει με καπνό και για υπόγεια.

Οι εικόνες από τις υπέρυθρες κάμερες τείνουν να είναι μονοχρωματικές, επειδή σχεδιάζονται με έναν μόνο τύπο αισθητήρα, ο οποίος ανταποκρίνεται σε μία περιοχή απλού μήκους κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οι έγχρωμες κάμερες απαιτούν πιο πολύπλοκη κατασκευή, ώστε να διαφοροποιηθεί το μήκος κύματος και το χρώμα έχει λιγότερη σημασία έξω από κανονικό φάσμα ορατότητας, επειδή τα διαφορετικά μήκη κύματος δεν λειτουργούν σταθερά στο σύστημα του χρωματικού πεδίου, που χρησιμοποιείται από τους ανθρώπους. Μερικές φορές αυτές οι μονοχρωματικές εικόνες φαίνονται στο pseudo – χρώμα, όπου οι αλλαγές στο χρώμα χρησιμοποιούνται σε σχέση με τις αλλαγές στην ένταση με την οποία εμφανίζονται οι αλλαγές στο σήμα. Αυτό είναι χρήσιμο, επειδή οι άνθρωποι έχουν πολύ μεγαλύτερη δυναμική περιοχή στην ένταση αντίληψης σε σχέση με το χρώμα συνολικά και η ικανότητα για να δουν λεπτές διαφορές σε φωτεινές περιοχές είναι οριακές. Αυτή η τεχνική ονομάζεται slicing της πυκνότητας.

Για χρήση σε μέτρηση θερμοκρασίας, τα πιο φωτεινά (ζεστότερα) μέρη της εικόνας έχουν άσπρο χρώμα, για ενδιάμεσες θερμοκρασίες είναι κόκκινα και κίτρινα, και τα πιο σκοτεινά (ψυχρότερα) κομμάτια είναι μπλε. Η ανάλυσή τους είναι θεωρητικά χαμηλότερη από αυτή των οπτικών καμερών, στις περισσότερες των οποίων είναι 160 x 120 ή 320 x 240 πίξελς. Οι θερμογραφικές κάμερες είναι ακόμη πιο ακριβές.

Η φωτογραφία από την θερμική εικόνα έχει πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι πυροσβέστες την χρησιμοποιούν για να δουν μέσα από τον καπνό, για να βρουν ανθρώπους και να εντοπίζουν εστίες φωτιάς και φωτιές. Με την θερμική εικόνα, οι τεχνικοί συντήρησης υψηλών γραμμών εντοπίζουν τα υπέρθερμα σημεία και μέρη, έτσι ώστε να εξαλείψουν πιθανοί κίνδυνοι. Οι θερμικές υπέρυθρες κάμερες εγκαθίστανται επίσης και σε πολυτελή αυτοκίνητα, με σκοπό να βοηθούν τον οδηγό. Οι cooled υπέρυθρες κάμερες χρησιμοποιούνται επίσης στην πλειοψηφία των τηλεσκοπίων.

Η κάμερα του εργαστηρίου καύσης είναι μια τέτοια κάμερα. Με την θερμοκάμερα επιχειρήθηκε η μέτρηση της θερμοκρασίας σε διάφορα σημεία του πορώδους καυστήρα που υπάρχει στο εργαστήριο και για διάφορους συνδυασμούς παροχής αέρα – παροχής προπανίου.

Για την λειτουργία της θερμοκάμερας ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Για λήψη φωτογραφίας:

Εισάγουμε την μπαταρία στο πίσω μέρος της κάμερας. Αποσπούμε το κάλυμμα του φακού της κάμερας και πατάμε το πράσινο κουμπί on/off για να ξεκινήσει η κάμερα. Ύστερα από 15 δευτερόλεπτα εμφανίζεται εικόνα με το λογότυπο FLIR, μέχρι τα κουμπιά χειρισμού της κάμερας να είναι έτοιμα για χρήση. Εστιάζουμε την κάμερα σε ένα ψυχρό αντικείμενο. Πατάμε το κουμπί A για να ενεργοποιήσουμε την αυτόματη βαθμονόμηση, ώστε να πετύχουμε την καλύτερη εικόνα. Ρυθμίζουμε την εστίαση της κάμερας, μετακινώντας το χειριστήριο (joystick) πάνω – κάτω.

Για μέτρηση θερμοκρασίας:

Πατάμε το κουμπί \blacktriangleleft για να εισαχθούμε στο menu system. Πηγαίνουμε στην λειτουργία spot function, μετακινώντας το χειριστήριο αριστερά – δεξιά. Πατάμε το κουμπί \blacktriangleleft όταν βρισκόμαστε στην ένδειξη spot. Ο κέρσορας του spot εμφανίζεται στην οθόνη (με μορφή σταυρού) και η μετρούμενη θερμοκρασία φαίνεται στην δεξιά πάνω γωνία. Αν επιλεγθεί η λειτουργία multiple spots (setup Analysis \rightarrow multiple spots \rightarrow on), το Analysis menu θα δείξει spot 1, spot 2 και spot 3 αντί της ένδειξης spot. Αν επιθυμούμε να αλλάξουμε την περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας, εισαγόμεστε στο menu system και μετακινώντας το χειριστήριο δεξιά, πηγαίνουμε στην ένδειξη (Object par...) Πατώντας το κουμπί \blacktriangleleft στο κάτω μέρος της οθόνης εμφανίζονται οι παράμετροι: Emiss (emissivity factor), Dist (distance) Tamb (ambient temperature) κ.α. Η παράμετρος Emiss ουσιαστικά εκφράζει τον συντελεστή εκπομπής της κάθε επιφανείας, ϵ . Ρυθμίζοντας τον συντελεστή αυτό να είναι ίδιος με τον συντελεστή επιφανείας της μετρούμενης επιφάνειας, λαμβάνουμε την θερμοκρασία της επιφανείας στη θερμοκάμερα. Αν μετακινηθούμε με το χειριστήριο στην ένδειξη (Man adjust...) και εισαχθούμε στην παράμετρο Temp range, η οποία βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης, καθορίζουμε την περιοχή θερμοκρασιών που επιθυμούμε να είμαστε. Υπάρχουν τρεις περιοχές θερμοκρασίας ((-40) – 120, 80 – 500 και 350 -2500 °C). Η παράμετρος Emiss ρυθμίζουμε την θερμοκρασία που μετράει η θερμοκάμερα. Ανάλογα με την περιοχή θερμοκρασιών που διαλέγουμε, αλλάζει και ο χρωματισμός της οθόνης.

Για αποθήκευση της εικόνας:

Πατάμε το κουμπί A και εστιάζουμε στην εικόνα. Πατάμε το κουμπί S για να παγώσουμε την εικόνα. Για να αποθηκεύσουμε, πατάμε το κουμπί S συνεχόμενα για ένα δευτερόλεπτο ή μέχρι το όνομα του αρχείου, στο οποίο θα αποθηκευτεί η εικόνα (π.χ. 181001) να φανεί στην οθόνη.

Με όλη αυτή την διαδικασία λαμβάνουμε και αποθηκεύουμε όσες εικόνες επιθυμούμε. Ύστερα τοποθετούμε την κάρτα μνήμης της θερμοκάμερας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου και μέσω του προγράμματος ThermaCam Researcher 2001 επεξεργάζονται οι εικόνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εικόνες ονομάζονται **θερμογραφήματα**.

α)



β)



γ)



Σχήμα 3.13. α) Η θερμοκάμερα ThermaCAM PM595, β) Η θερμοκάμερα και ο τρόπος σύνδεσης με μόνιτορ, γ) Ο πορώδης καυστήρας, στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις θερμοκρασίας.

3.1.3. ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ MRU Delta 2000 CD – IV

Ο αναλυτής καυσαερίων διαθέτει τους εξής αισθητήρες:

- ✓ Οξυγόνου (O_2),
- ✓ Μονοξειδίου του άνθρακα (CO),
- ✓ Μονοξειδίου του άνθρακα ως 10%,
- ✓ Μονοξειδίου του άνθρακα ως 20000 ppm,
- ✓ Διοξειδίου του θείου (SO_2),
- ✓ Οξειδίων του αζώτου (NO_x) έως 200 ppm,
- ✓ Μονοξειδίου του αζώτου (NO),

- ✓ Θερμοκρασίας (Θερμοστοιχείο τύπου NiCr),
- ✓ Πίεσης (πιεζοστατικός αισθητήρας πίεσης)

Το οξυγόνο που εμφανίζεται στα καυσαέρια οφείλεται στην περίσσια του αέρα καύσης. Αν και δεν αποτελεί ρύπο, η μέτρησή του επιβάλλεται για διάφορους λόγους, όπως η αναγωγή των συγκεκριμένων ρύπων σε συγκεκριμένη συγκέντρωση οξυγόνου αναφοράς, ο προσδιορισμός της πυκνότητας των καυσαερίων, η ρύθμιση της παροχής του αέρα καύσης κ.α. Μία σημαντική μέθοδος μέτρησής του είναι η *ηλεκτροχημική ανίχνευση* [1].

Σε αυτή την περίπτωση, το προς μέτρηση δείγμα, χωρίζεται από ένα δείγμα αναφοράς με μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη (οξειδίο του ζirkονίου). Ο ιονισμός των δύο δειγμάτων, προκαλεί διαφορετική συγκέντρωση ιόντων οξυγόνου στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στα άκρα του ηλεκτρική τάση, η οποία μπορεί να μετρηθεί και με κατάλληλη βαθμονόμηση, να υπολογιστεί η περιεκτικότητα του δείγματος σε O_2 .

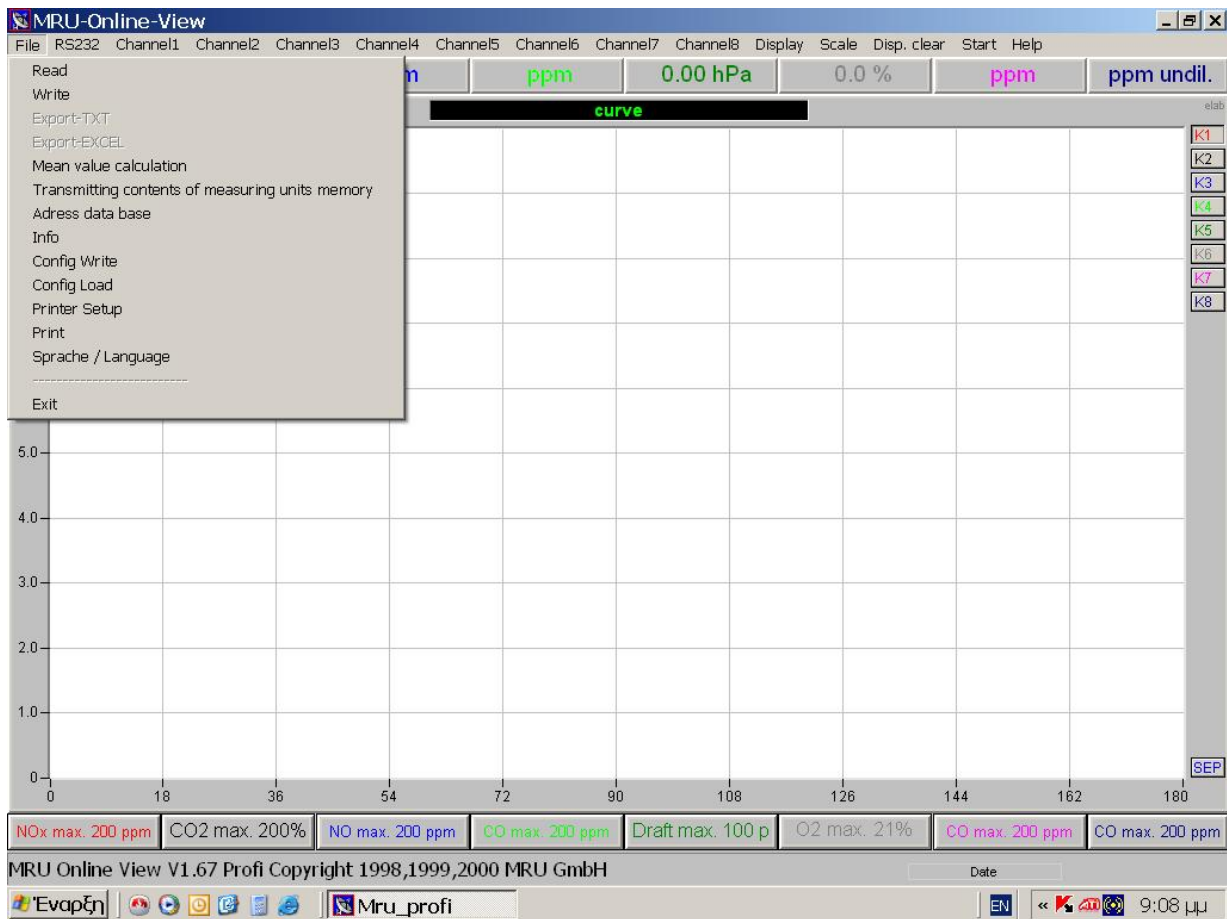
Επιπλέον τα οξείδια του αζώτου, αποτελούν παραπροϊόντα της διαδικασίας της καύσης και θεωρούνται σημαντικοί ρύποι. Η μέτρηση της περιεκτικότητάς τους βασίζεται στην αρχή της **χημικοφωταύγας**, της φωτοχημικής αντίδρασης δηλαδή μεταξύ όζοντος (O_3) και μονοξειδίου του αζώτου (NO), κατά την οποία παράγεται διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και οξυγόνο (O_2). Η συσκευή μέτρησης, διαθέτει μια μονάδα παραγωγής όζοντος και μια μονάδα μετατροπής του υπάρχοντος NO_2 στα καυσαέρια σε NO. Η αντίδραση του NO με το O_3 , έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτός, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της ποσότητας του NO_2 που επίσης παράγεται. Η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας μετράται με κατάλληλο φωτοπολλαπλασιαστή και ανάγεται στην περιεκτικότητα των καυσαερίων σε NO_x .

Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων είναι η εξής:

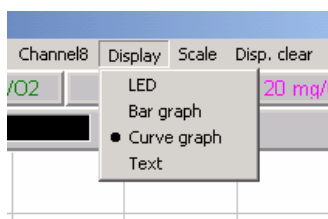
Το πιστόλι του αναλυτή τοποθετείται στην ξύλινη υποδοχή, που βρίσκεται στο πάνω άκρο του στελέχους. Το στέλεχος έχει προσαρμοσθεί στην προεξοχή, πάνω στην οποία προσαρμόζεται το θερμοστοιχείο τύπου K. Υπάρχει η δυνατότητα της καθ' ύψους ρύθμισης του στελέχους και συνεπώς του πιστολιού του αναλυτή.

Επίσης, είναι δυνατή η σύνδεση του αναλυτή καυσαερίων με τον H/Y, μέσω του καλωδίου που συνοδεύει την συσκευή. Με την βοήθεια του λογισμικού που συνοδεύει τον αναλυτή καυσαερίων, οι τιμές αποθηκεύονται σε αρχεία για περαιτέρω ανάλυση, παρουσιάζονται δε σε μορφή διαγράμματος συναρτήσεως του χρόνου στην οθόνη λειτουργίας του προγράμματος.

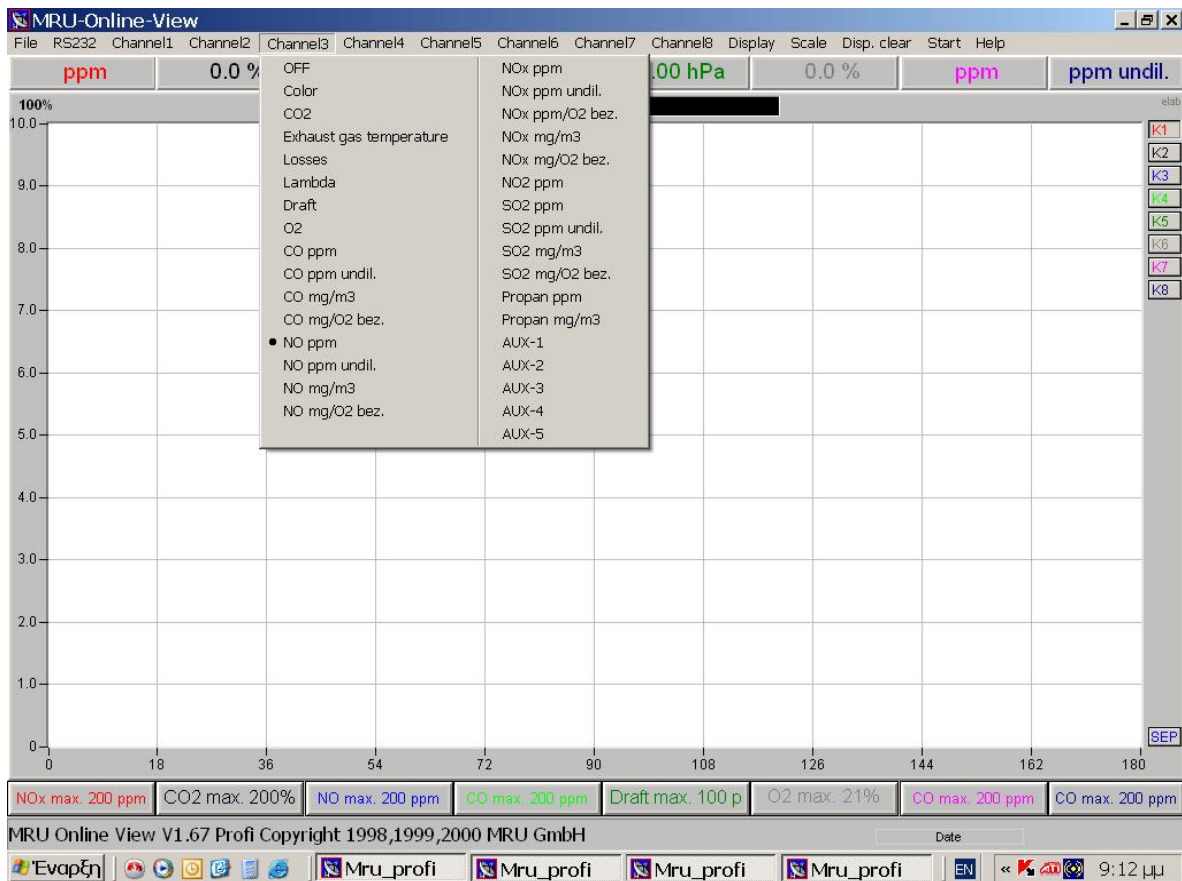
Παρακάτω φαίνεται η οθόνη λειτουργίας του προγράμματος MRU – Profile View.



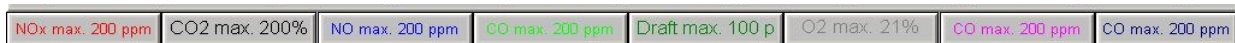
Αφού ο αναλυτής καυσαερίων συνδεθεί με τον Η/Υ και προτού αρχίσει η καταγραφή των τιμών των εκπομπών από το πρόγραμμα, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει το αρχείο, στο οποίο θα καταγραφούν οι τιμές των μετρήσεων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της επιλογής **write** μενού **file**. Ο χρήστης επιλέγει το όνομα του αρχείου, στο οποίο θα καταγραφούν οι τιμές, ενώ υπάρχει η δυνατότητα της καταγραφής τιμών σε ήδη υπάρχον αρχείο. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της μορφής, με την οποία θα καταγράφονται τα δεδομένα (μέσω του μενού **display**). Εδώ έχει επιλεγεί η καταγραφή με την μορφή διαγραμμάτων (**curve graph**).



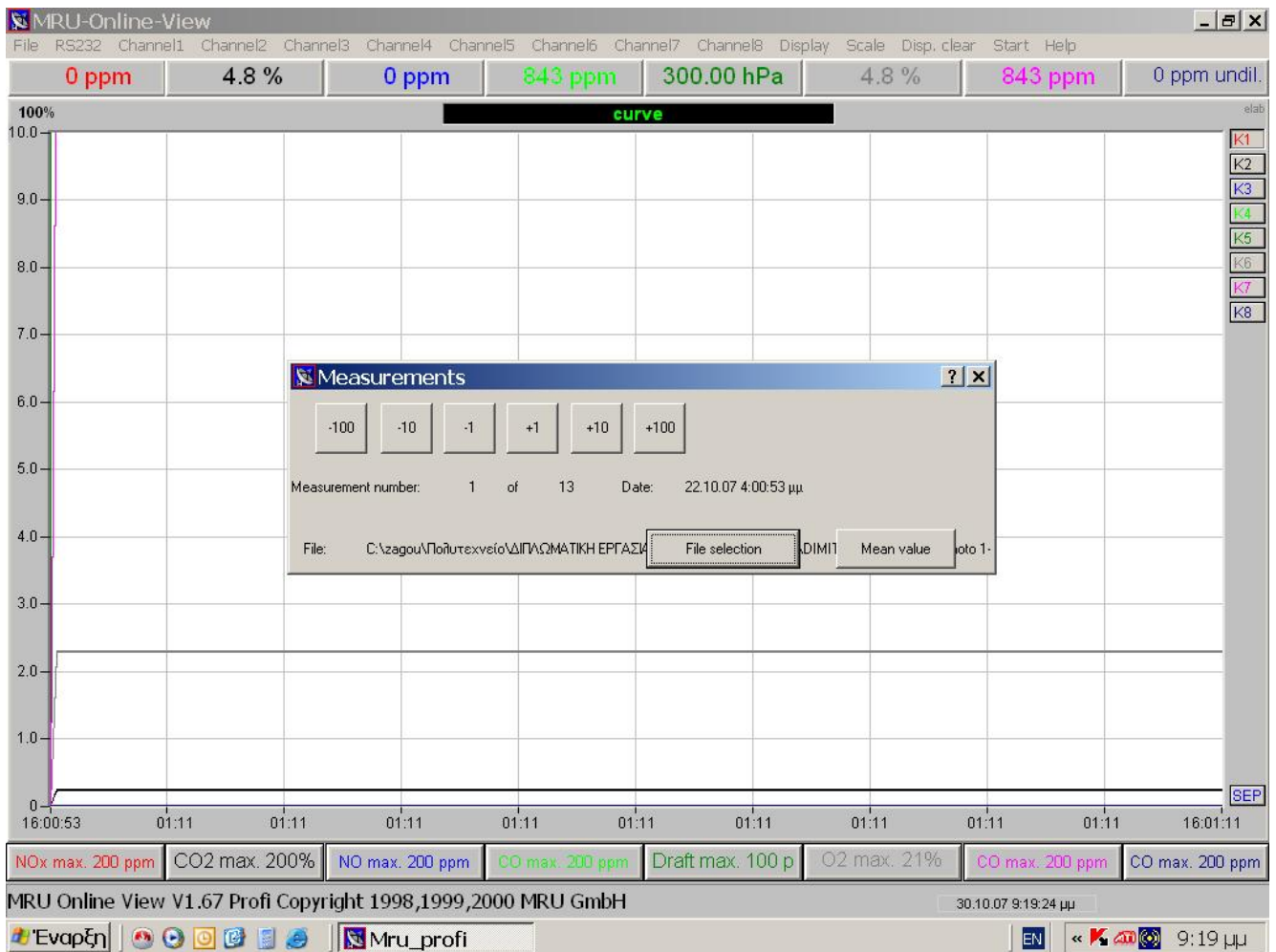
Από το μενού **channel** γίνεται η επιλογή των μεγεθών που θα μετρηθούν. Τα μεγέθη που έχουμε επιλέξει είναι: NO_x (σε ppm), CO₂ (σε %), NO (σε ppm), CO (σε ppm), O₂ (σε %).



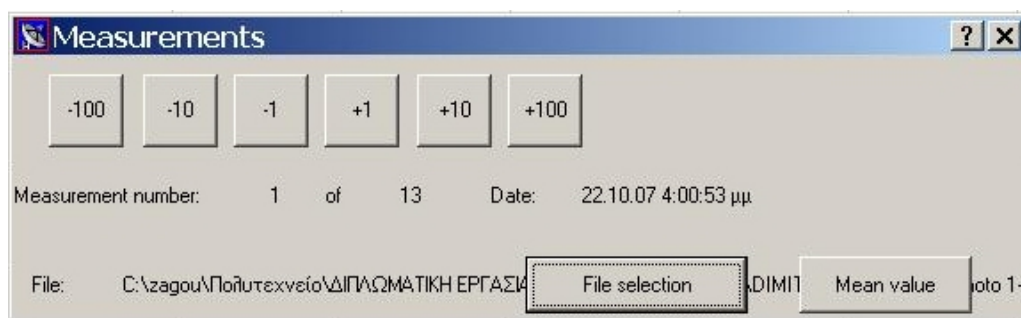
Μέσω των εικονιδίων του κάτω μέρους της οθόνης ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει ποιες από τις μετρήσεις επιθυμεί να εμφανίζονται στο γράφημα.



Με την επιλογή **read** του μενού **file**, ο χρήστης μπορεί να διαβάσει τα υπάρχοντα αρχεία, τα οποία υπάρχουν σε μορφή γραφήματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



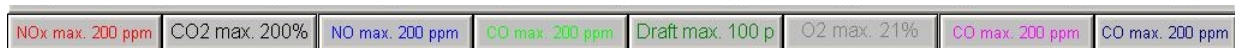
Μέσω του παραθύρου **measurements**, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την τιμή που επιθυμεί:



Οι τιμές εμφανίζονται στο πάνω μέρος της οθόνης.



ενώ στο κάτω μέρος παρατηρούμε σε ποιο μέγεθος αντιστοιχεί η κάθε τιμή:



Το πρόγραμμα **MRU-profile view** καταγράφει τιμές ανά δύο δευτερόλεπτα. Ενδιαφέρον έχουν οι τιμές των εκπομπών καυσαερίων για κάθε σημείο λειτουργίας, αφού οι συνθήκες έχουν σταθεροποιηθεί. Οι τιμές αυτές καταγράφονται σε αρχεία **MS Excel**, μέσω των οποίων δημιουργούνται διαγράμματα των εκπομπών NO_x και CO.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

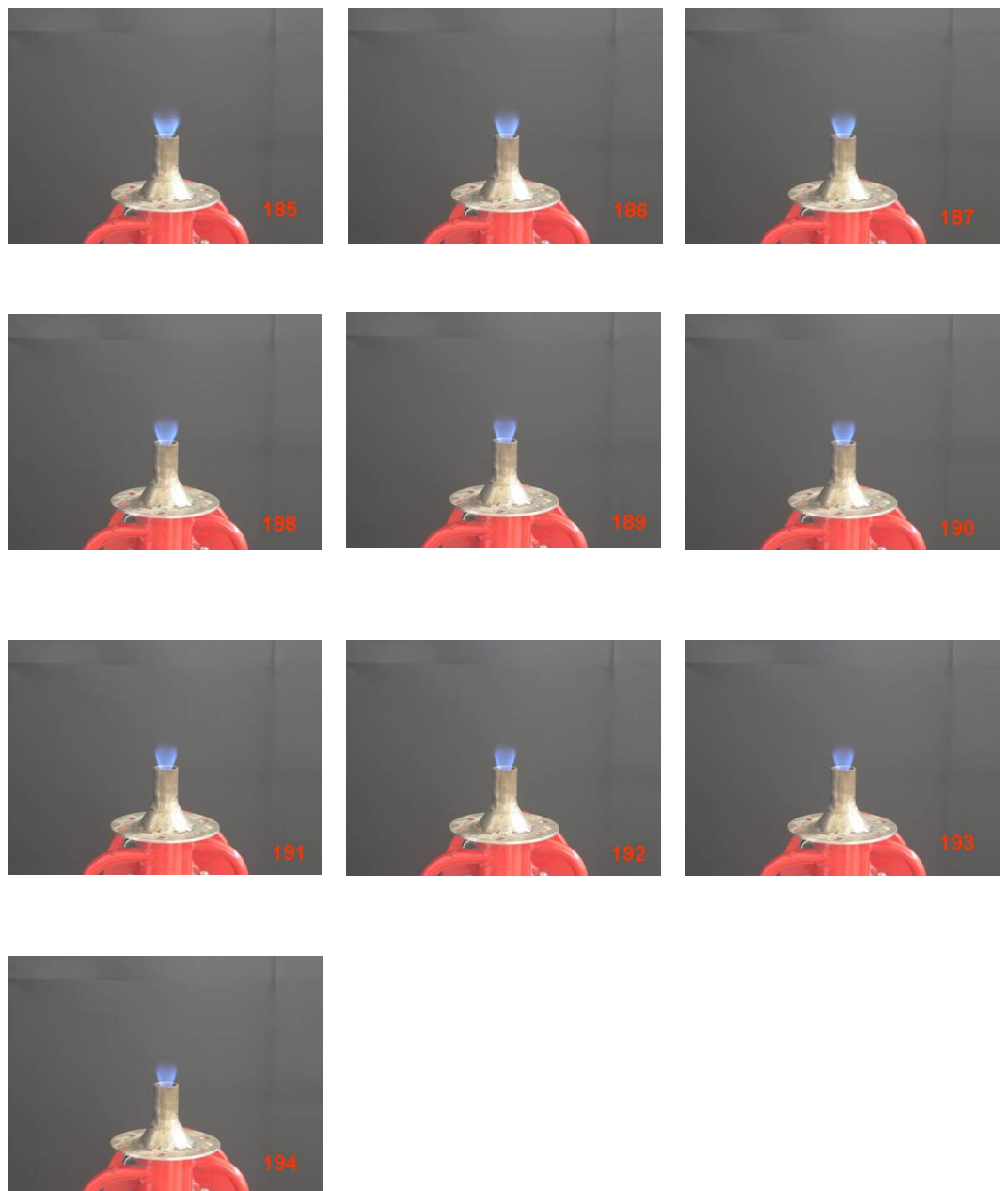
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων στον καυστήρα συστροφής και στον πορώδη καυστήρα. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται μία πρώτη προσπάθεια χαρτογράφησης των διακριτών περιοχών καύσης μεθανίου στον καυστήρα συστροφής μέσω της φωτογραφικής απεικόνισης σειράς φλογών. Οι φλόγες αυτές καλύπτουν εύρος λόγων ισοδυναμίας καυσίμου – αέρα, ϕ , μετρημένου στην έξοδο του καυστήρα (από 0.4-10) και μεγάλο εύρος παροχών καυσίμου Q_f (5 – 35 lt/min) και παροχών αέρα Q_a (5 – 370 lt/min).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται μετρήσεις θερμοκρασίας, NO_x και CO σε εννέα χαρακτηριστικές φλόγες. Τέλος μετρήθηκαν οι κατανομές των θερμοκρασιών στον πορώδη καυστήρα για καύση μείγματος προπανίου – αέρα.

4.1. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΛΟΓΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ

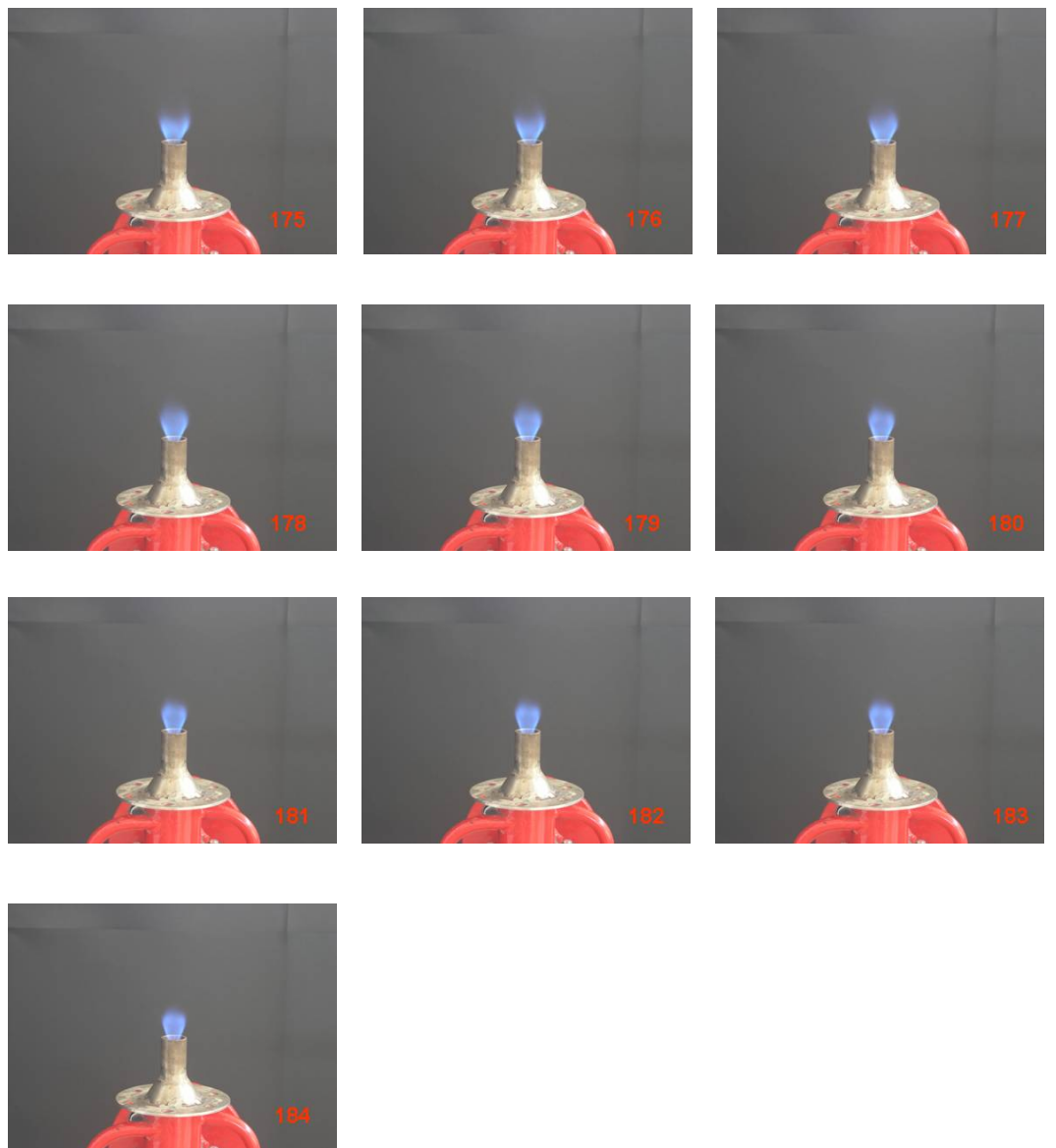
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ένα σύνολο 194 φωτογραφιών που ελήφθησαν με την χρήση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής OLYMPUS C-5060 για λόγους ισοδυναμίας μεθανίου – αέρα, ϕ , μετρημένου στην έξοδο του καυστήρα από 0.4-10 και για διάφορους συνδυασμούς παροχών Q_f και Q_a στο κάθε ϕ . Οι φωτογραφίες παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1. – 4.13.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\phi=0,4$		
ϕ	0,4	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	119,0	185
7,0	166,6	186
8,0	190,4	187
9,0	214,2	188
10,0	238,0	189
11,0	261,8	190
12,0	285,6	191
13,0	309,4	192
14,0	333,2	193
15,0	357,0	194



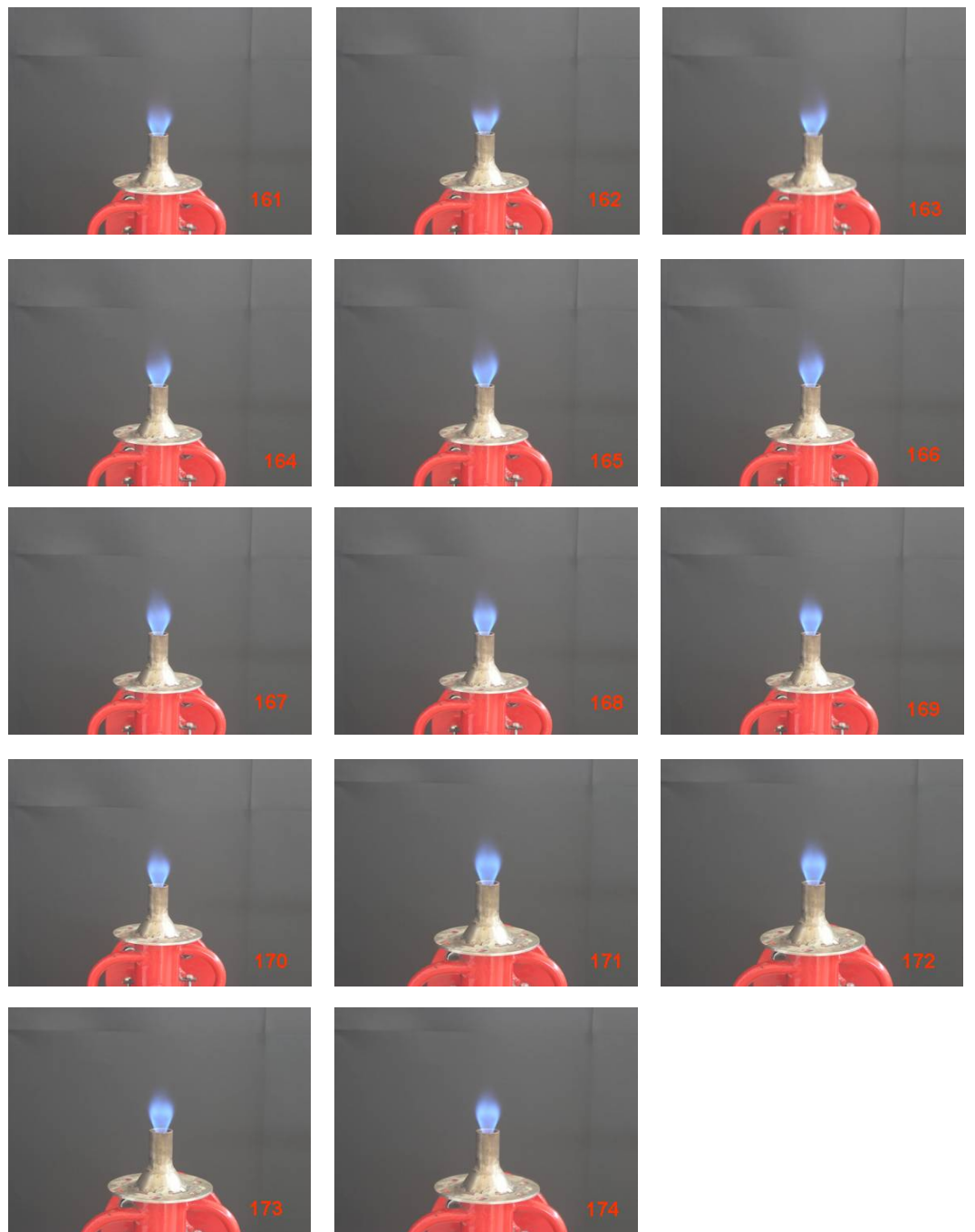
Σχήμα 4.1. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\phi=0.4$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\phi=0,6$		
ϕ	0,6	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	79,3	175
7,0	111,1	176
9,0	142,8	177
11,0	174,5	178
13,0	206,3	179
15,0	238,0	180
17,0	269,7	181
19,0	301,5	182
21,0	333,2	183
23,0	364,9	184



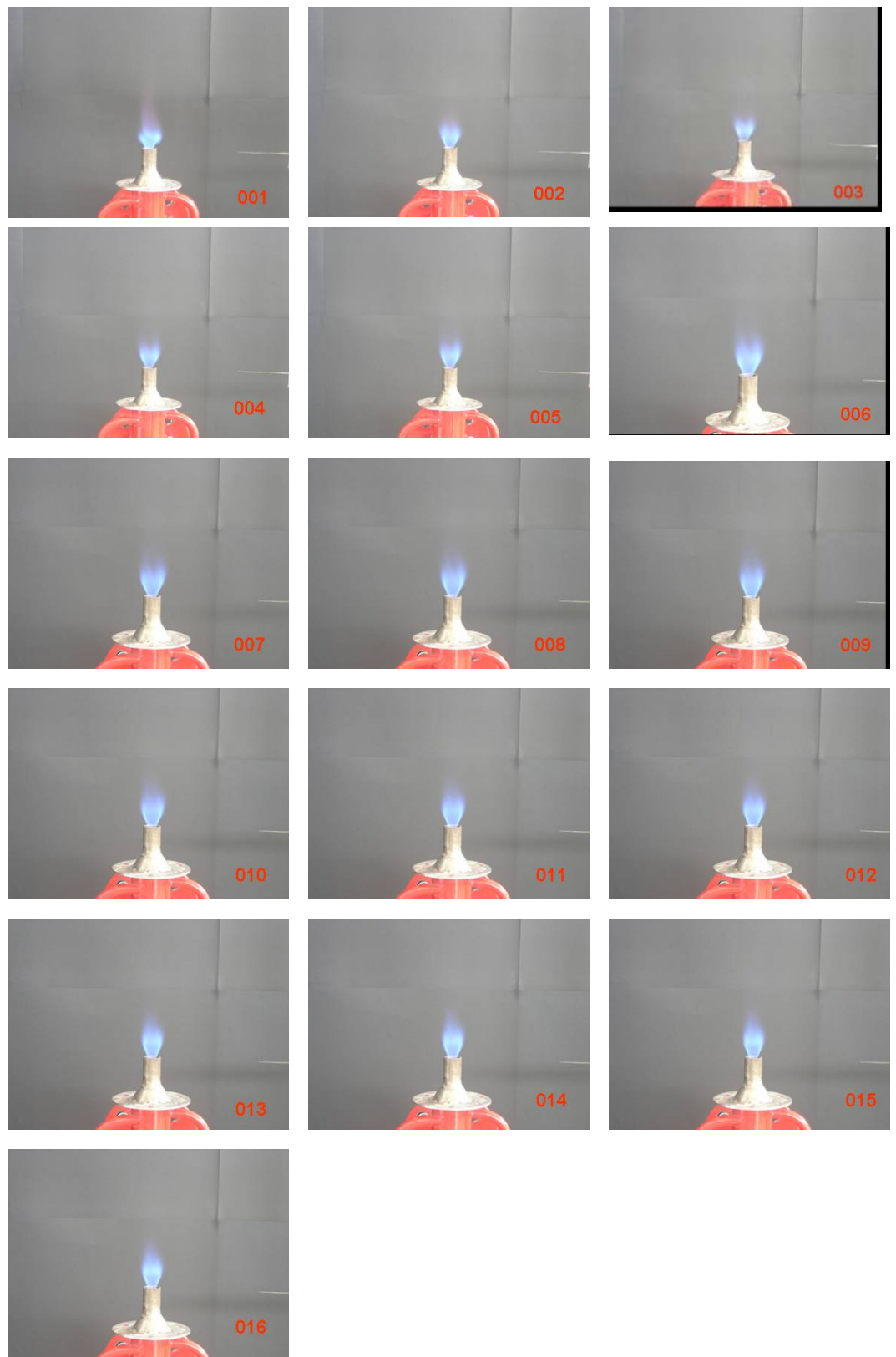
Σχήμα 4.2. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\phi=0.6$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=0,8$		
φ	0,8	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	59,5	161
7,0	83,3	162
9,0	107,1	163
11,0	130,9	164
13,0	154,7	165
15,0	178,5	166
17,0	202,3	167
19,0	226,1	168
21,0	249,9	169
23,0	273,7	170
25,0	297,5	171
27,0	321,3	172
29,0	345,1	173
31,0	368,9	174



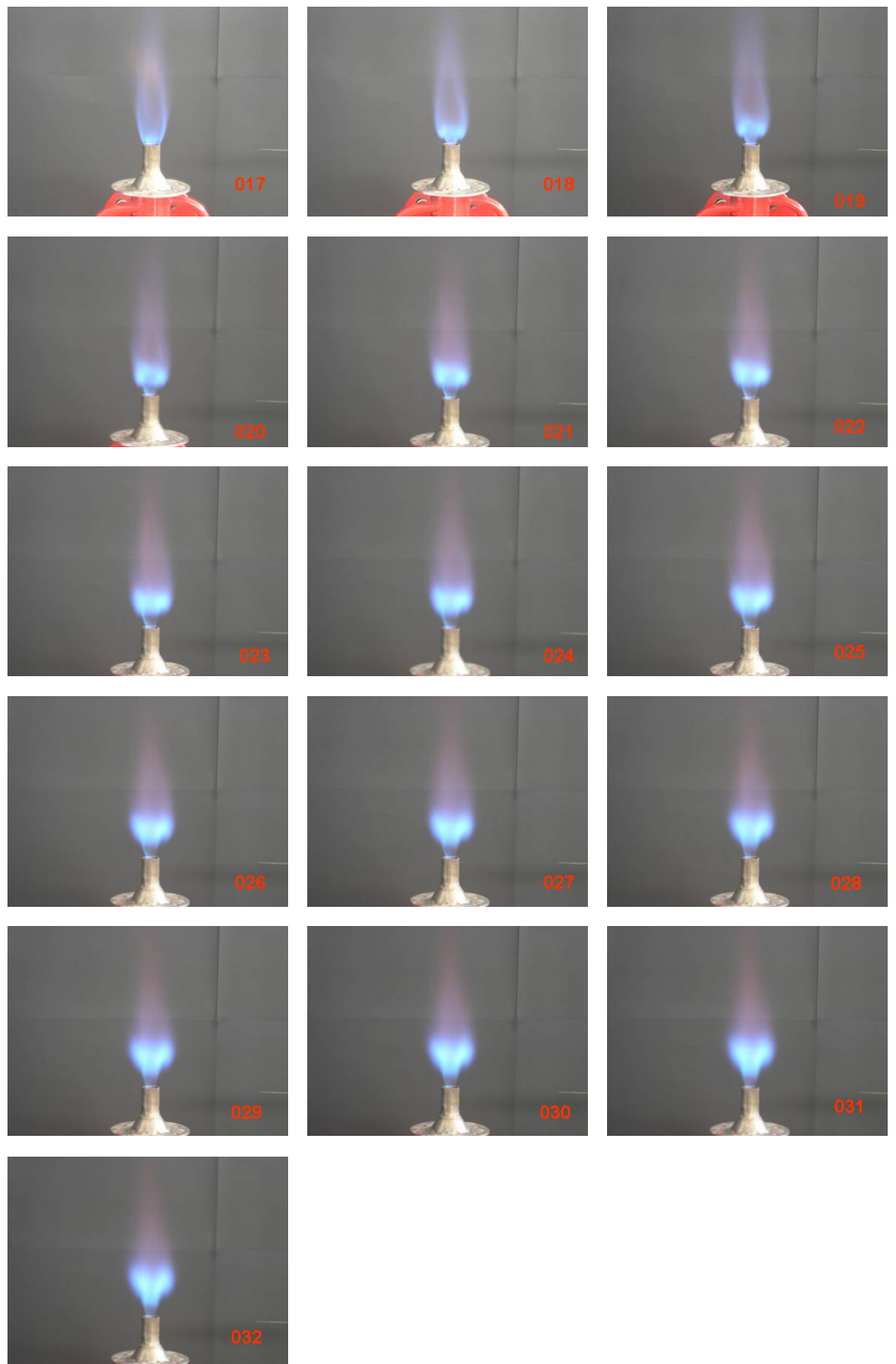
Σχήμα 4.3. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=0.8$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=1$		
φ	1,0	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	47,6	1
7,0	66,6	2
9,0	85,7	3
11,0	104,7	4
13,0	123,8	5
15,0	142,8	6
17,0	161,8	7
19,0	180,9	8
21,0	199,9	9
23,0	219,0	10
25,0	238,0	11
27,0	257,0	12
29,0	276,1	13
31,0	295,1	14
33,0	314,2	15
35,0	333,2	16



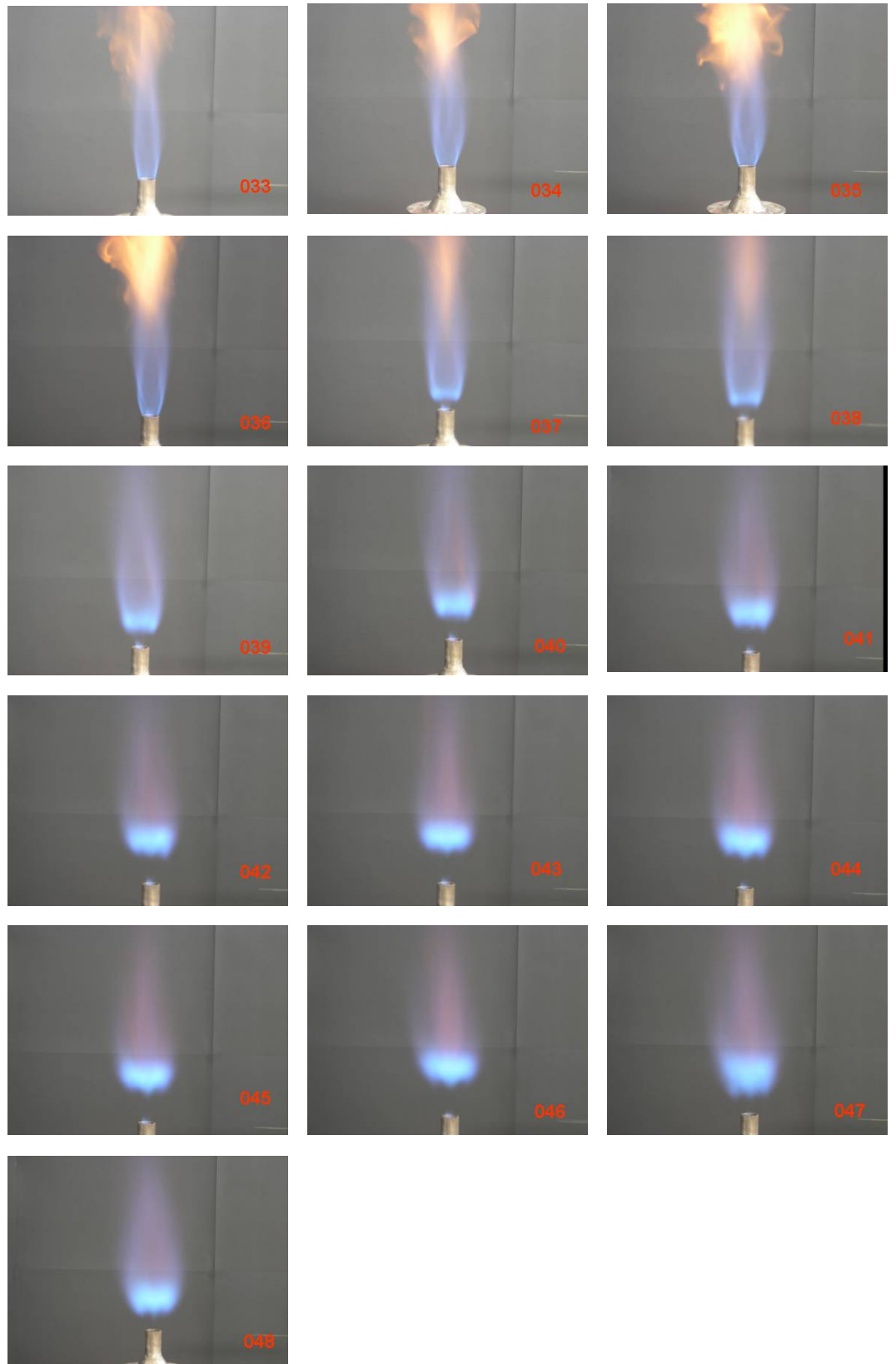
Σχήμα 4.4. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=1$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=2$		
φ	2	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	23,8	17
7,0	33,3	18
9,0	42,8	19
11,0	52,4	20
13,0	61,9	21
15,0	71,4	22
17,0	80,9	23
19,0	90,4	24
21,0	100,0	25
23,0	109,5	26
25,0	119,0	27
27,0	128,5	28
29,0	138,0	29
31,0	147,6	30
33,0	157,1	31
35,0	166,6	32



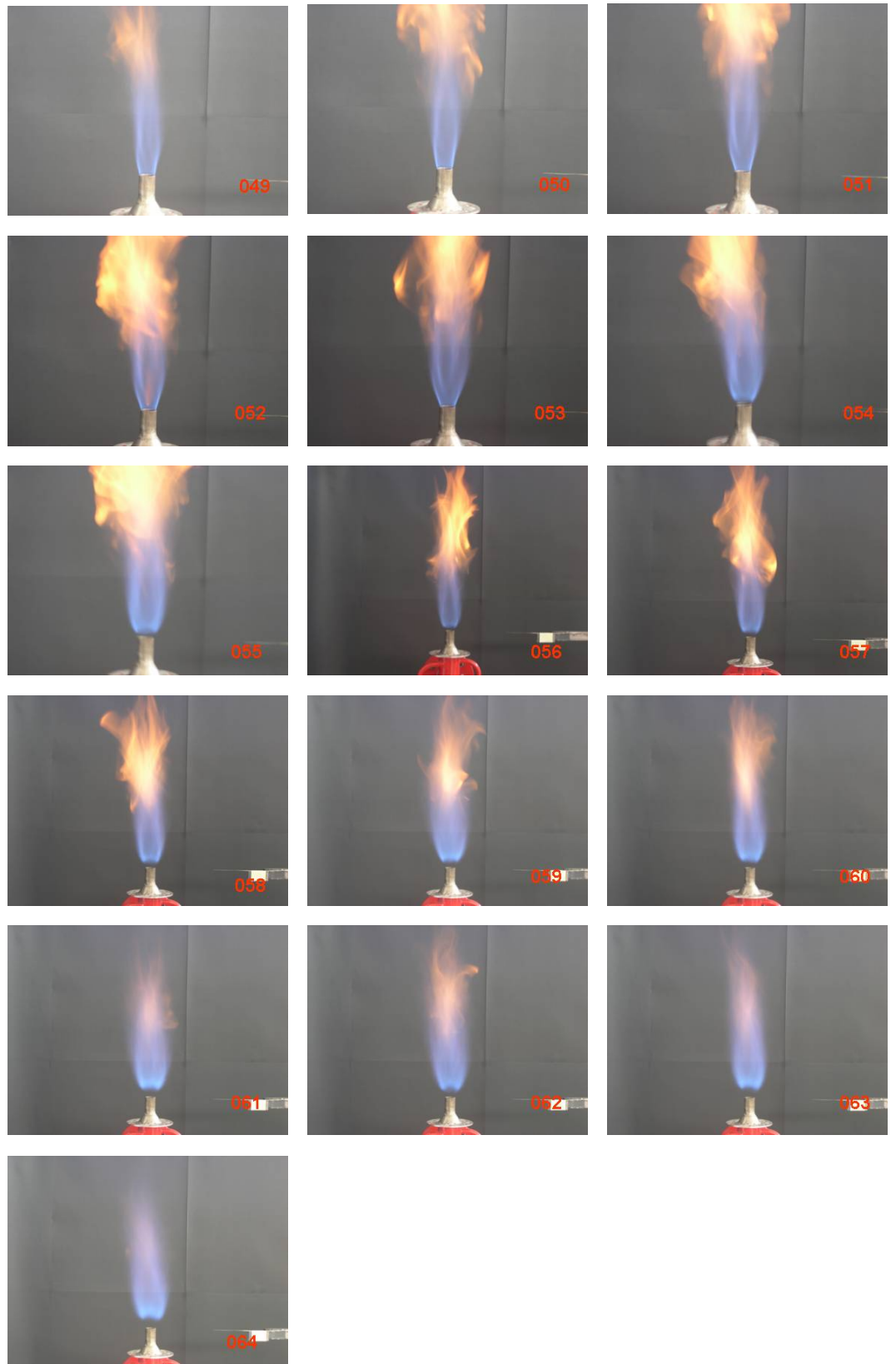
Σχήμα 4.5. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=2$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=3$		
φ	3	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	15,9	33
7,0	22,2	34
9,0	28,6	35
11,0	34,9	36
13,0	41,3	37
15,0	47,6	38
17,0	53,9	39
19,0	60,3	40
21,0	66,6	41
23,0	73,0	42
25,0	79,3	43
27,0	85,7	44
29,0	92,0	45
31,0	98,4	46
33,0	104,7	47
35,0	111,1	48



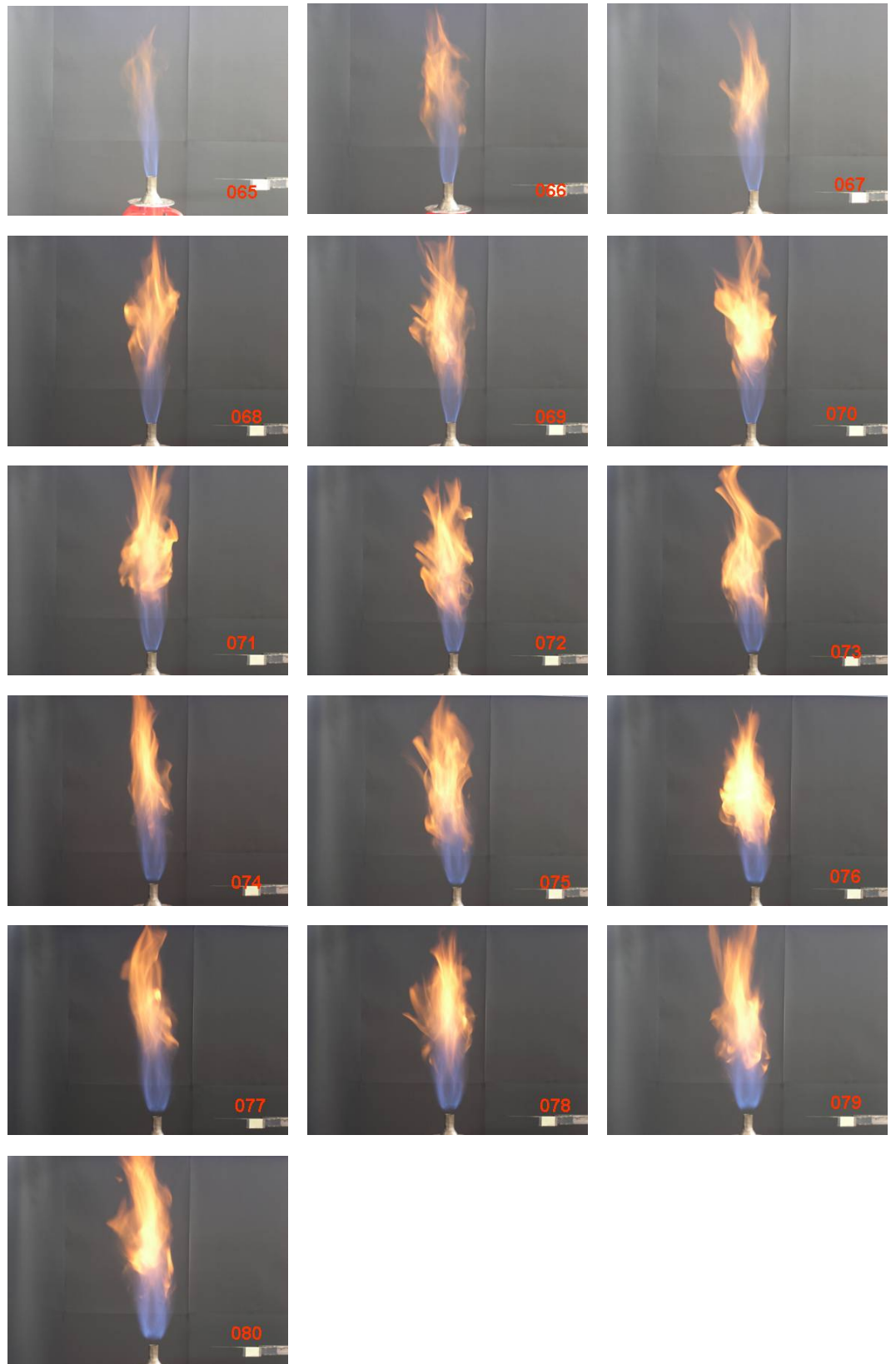
Σχήμα 4.6. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=3$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=4$		
φ	4	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	11,9	49
7,0	16,7	50
9,0	21,4	51
11,0	26,2	52
13,0	30,9	53
15,0	35,7	54
17,0	40,5	55
19,0	45,2	56
21,0	50,0	57
23,0	54,7	58
25,0	59,5	59
27,0	64,3	60
29,0	69,0	61
31,0	73,8	62
33,0	78,5	63
35,0	83,3	64



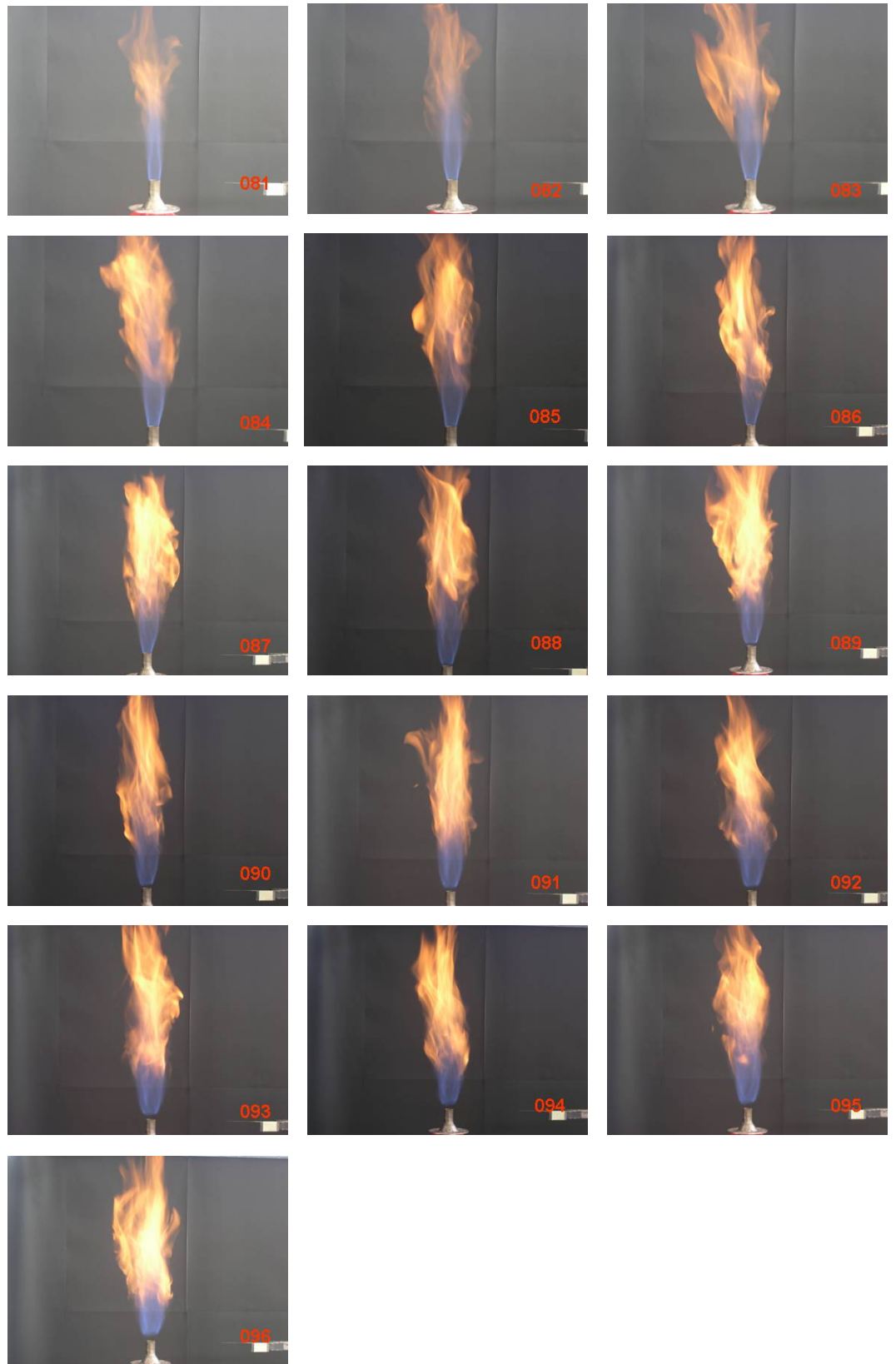
Σχήμα 4.7. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=4$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=5$		
φ	5	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	9,5	65
7,0	13,3	66
9,0	17,1	67
11,0	20,9	68
13,0	24,8	69
15,0	28,6	70
17,0	32,4	71
19,0	36,2	72
21,0	40,0	73
23,0	43,8	74
25,0	47,6	75
27,0	51,4	76
29,0	55,2	77
31,0	59,0	78
33,0	62,8	79
35,0	66,6	80



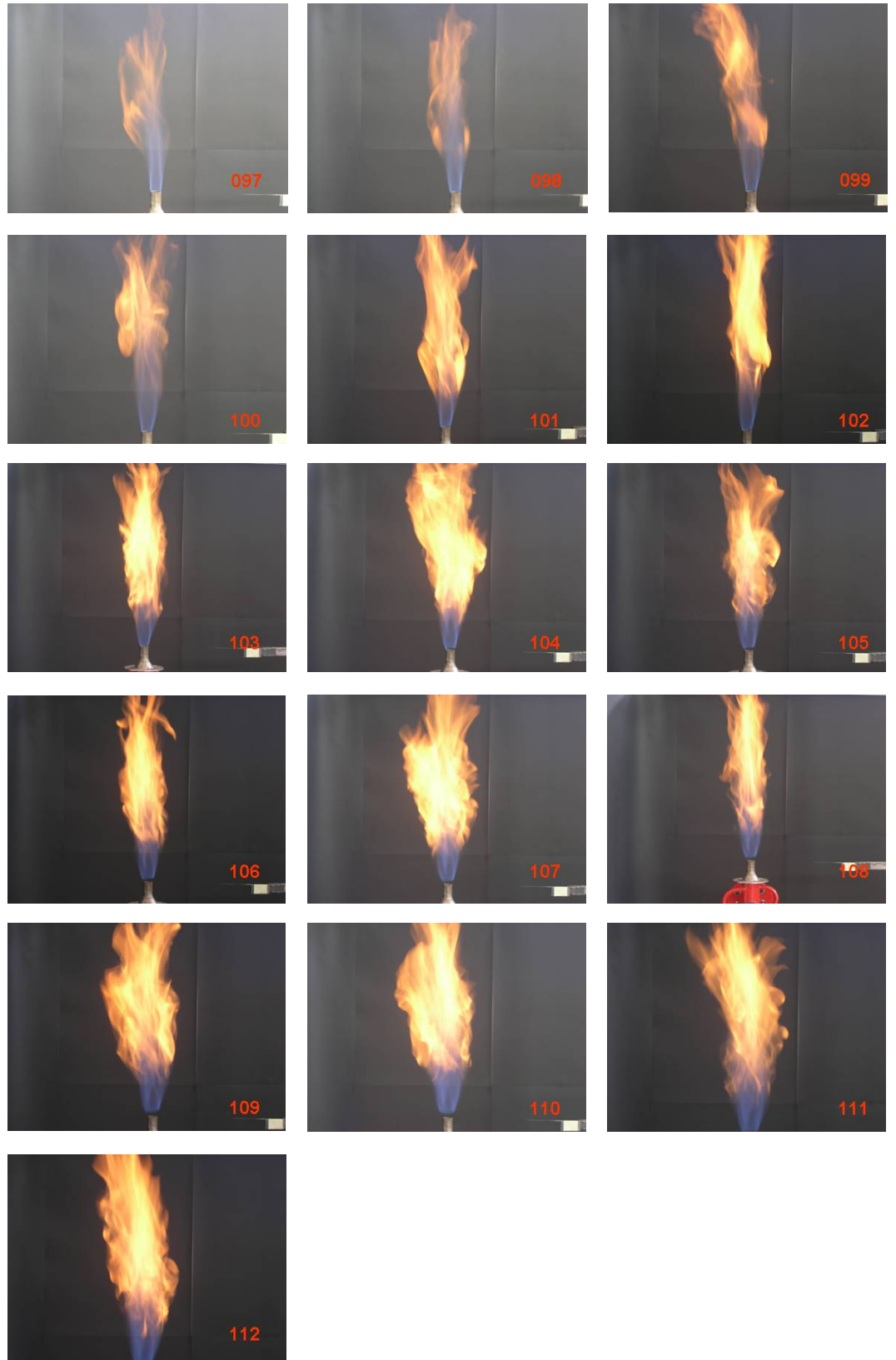
Σχήμα 4.8. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=5$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=6$		
φ	6	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	7,9	81
7,0	11,1	82
9,0	14,3	83
11,0	17,5	84
13,0	20,6	85
15,0	23,8	86
17,0	27,0	87
19,0	30,1	88
21,0	33,3	89
23,0	36,5	90
25,0	39,7	91
27,0	42,8	92
29,0	46,0	93
31,0	49,2	94
33,0	52,4	95
35,0	55,5	96



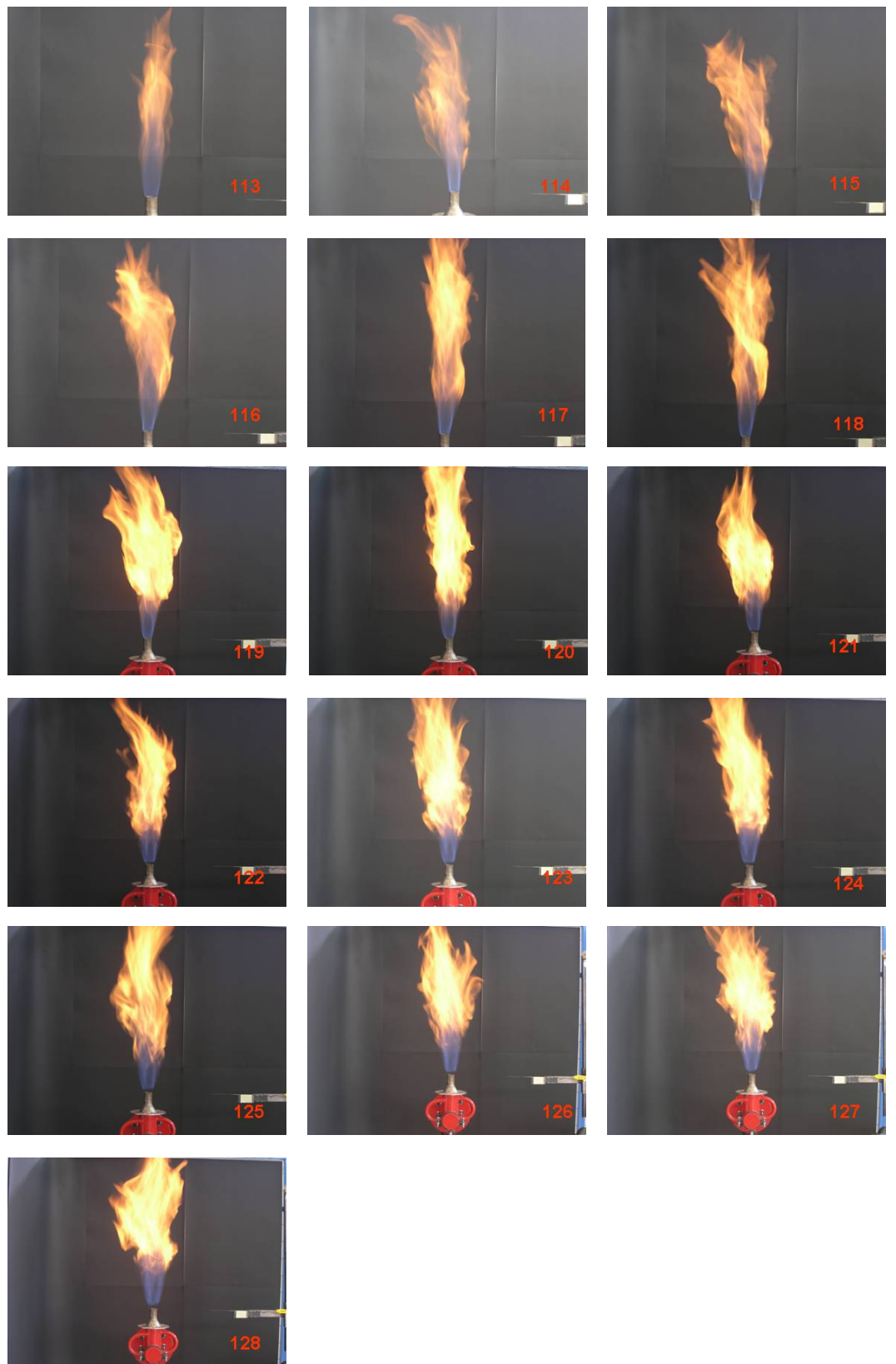
Σχήμα 4.9. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=6$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\phi=7$		
ϕ	7	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	6,8	97
7,0	9,5	98
9,0	12,2	99
11,0	15,0	100
13,0	17,7	101
15,0	20,4	102
17,0	23,1	103
19,0	25,8	104
21,0	28,6	105
23,0	31,3	106
25,0	34,0	107
27,0	36,7	108
29,0	39,4	109
31,0	42,2	110
33,0	44,9	111
35,0	47,6	112



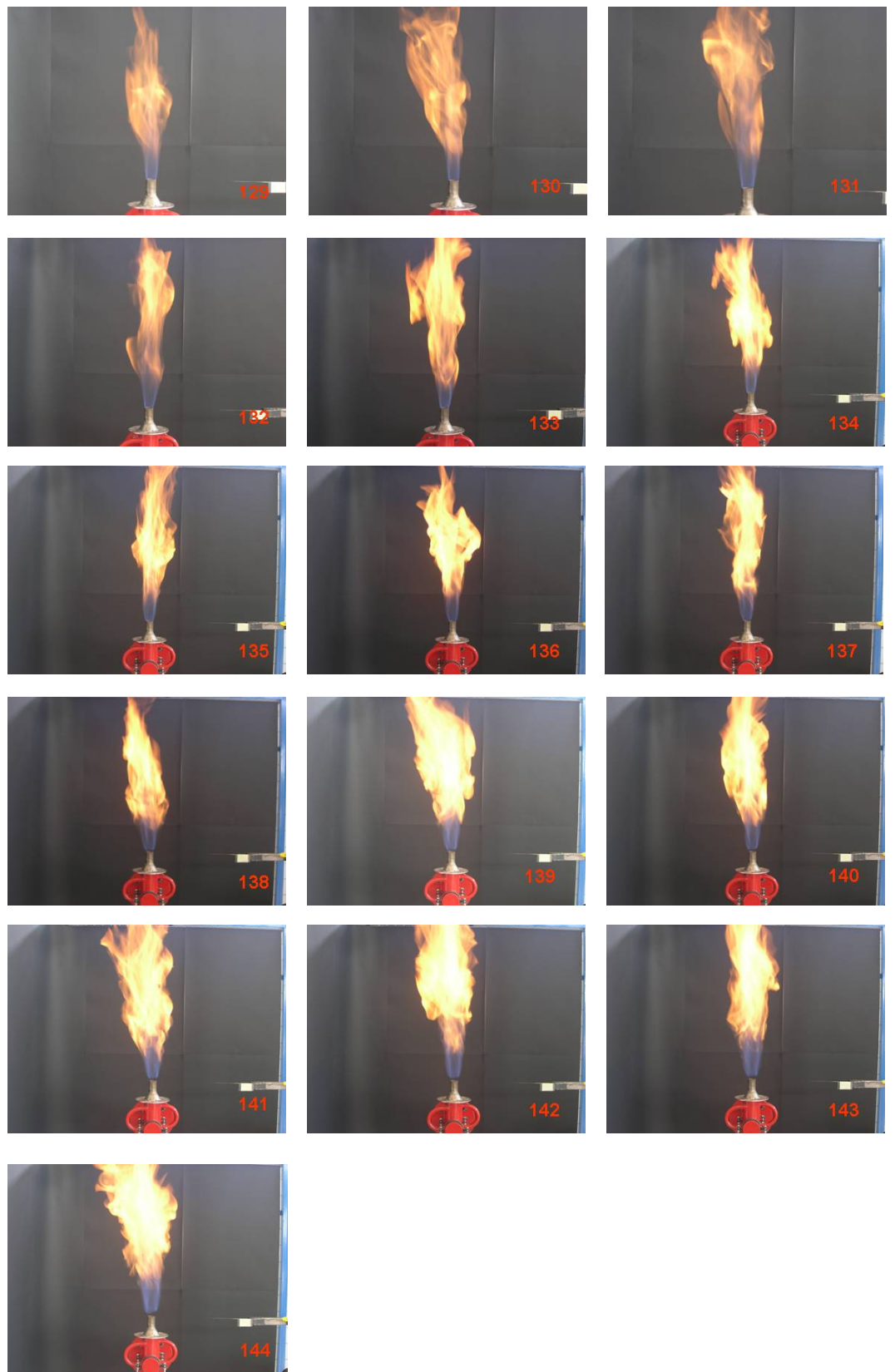
Σχήμα 4.10. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\phi=7$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\phi=8$		
ϕ	8	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	6,0	113
7,0	8,3	114
9,0	10,7	115
11,0	13,1	116
13,0	15,5	117
15,0	17,9	118
17,0	20,2	119
19,0	22,6	120
21,0	25,0	121
23,0	27,4	122
25,0	29,8	123
27,0	32,1	124
29,0	34,5	125
31,0	36,9	126
33,0	39,3	127
35,0	41,7	128



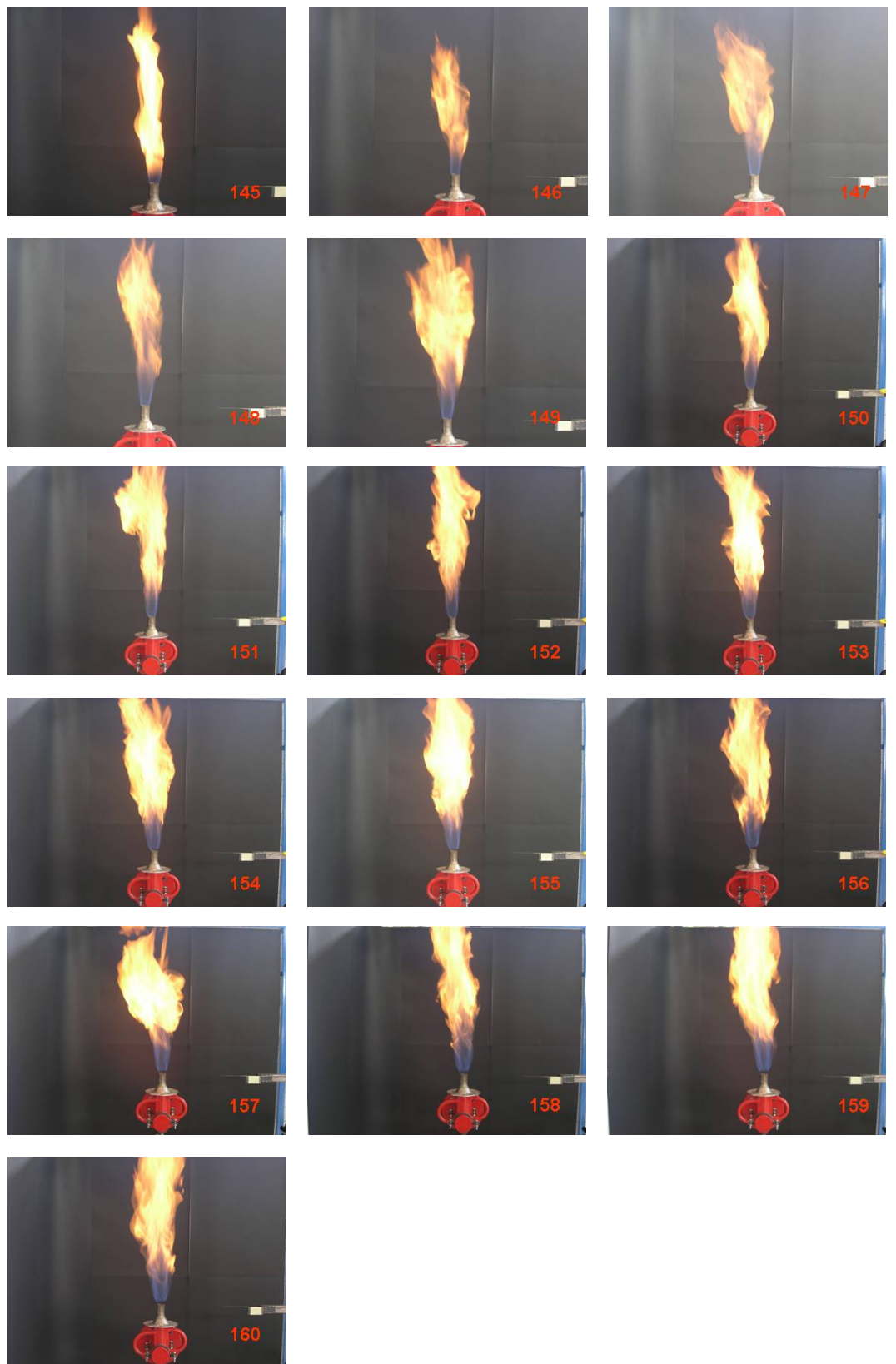
Σχήμα 4.11. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\phi=8$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=9$		
φ	9	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	5,3	129
7,0	7,4	130
9,0	9,5	131
11,0	11,6	132
13,0	13,8	133
15,0	15,9	134
17,0	18,0	135
19,0	20,1	136
21,0	22,2	137
23,0	24,3	138
25,0	26,4	139
27,0	28,6	140
29,0	30,7	141
31,0	32,8	142
33,0	34,9	143
35,0	37,0	144



Σχήμα 4.12. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=9$) στον καυστήρα συστροφής.

ΜΕΘΑΝΙΟ		
$\varphi=10$		
φ	10	
Qf lt/min	Qa lt/min	photo
5,0	4,8	145
7,0	6,7	146
9,0	8,6	147
11,0	10,5	148
13,0	12,4	149
15,0	14,3	150
17,0	16,2	151
19,0	18,1	152
21,0	20,0	153
23,0	21,9	154
25,0	23,8	155
27,0	25,7	156
29,0	27,6	157
31,0	29,5	158
33,0	31,4	159
35,0	33,3	160

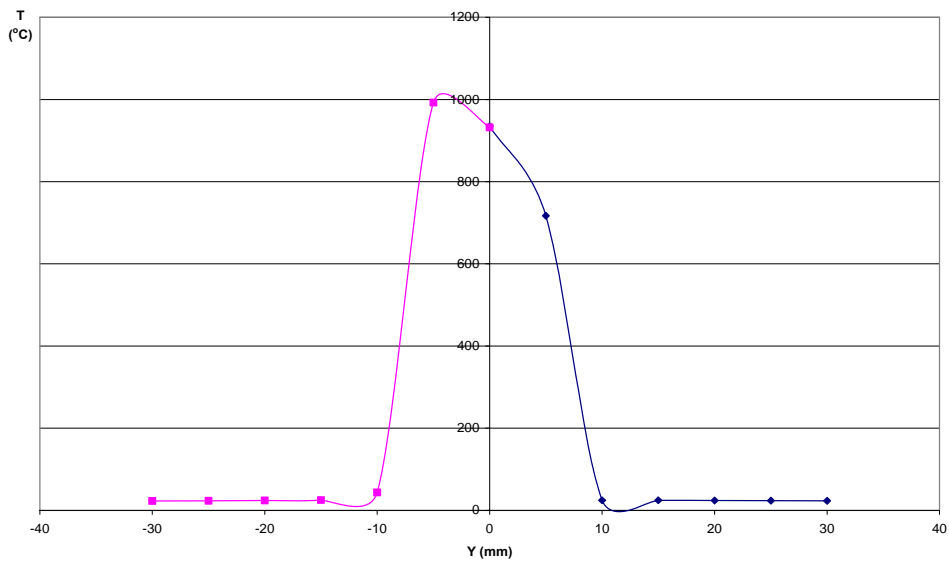
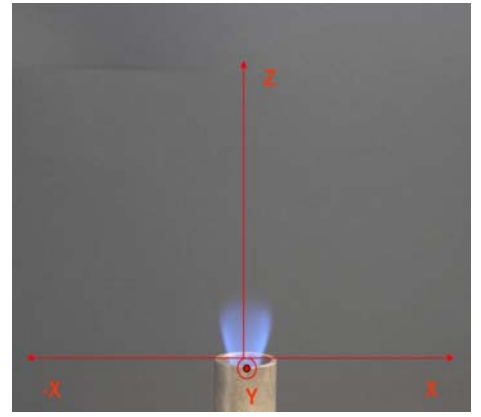
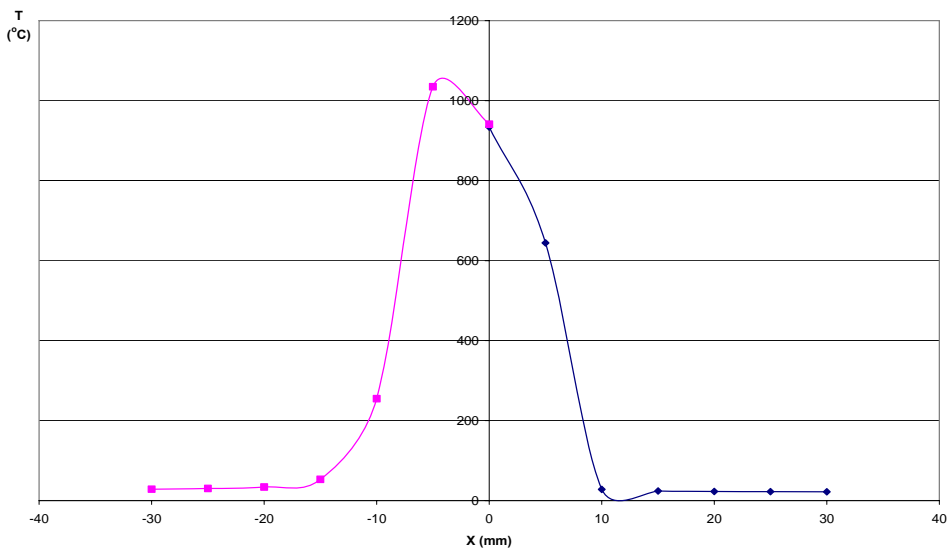


Σχήμα 4.13. Φωτογραφική απεικόνιση φλογών μεθανίου – αέρα ($\varphi=10$) στον καυστήρα συστροφής.

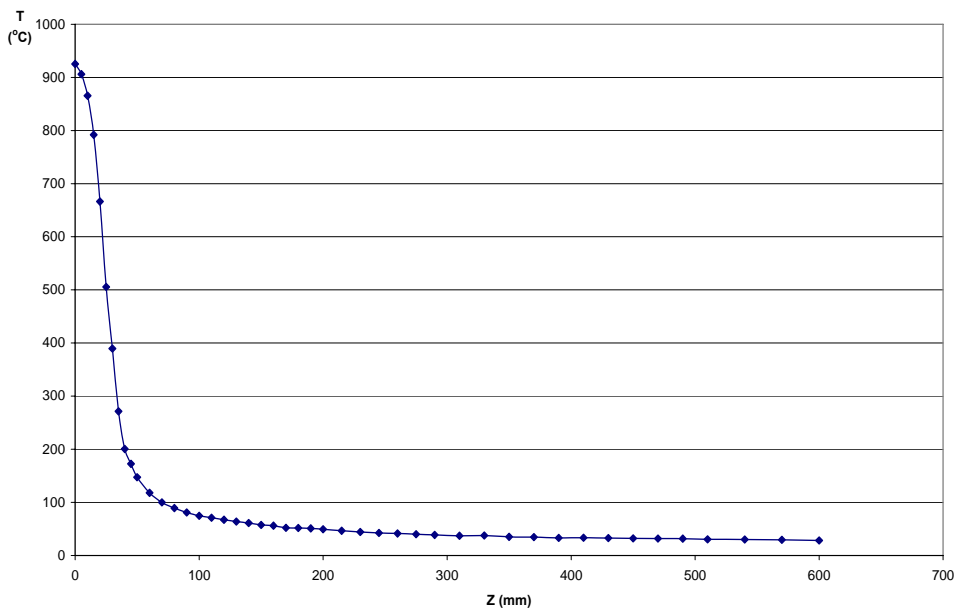
Η ανάλυση των παραπάνω φωτογραφιών καταδεικνύει την ύπαρξη τριών διακριτών περιοχών καύσης. Στην πρώτη που συναντάται κυρίως σε συνθήκες πτωχής καύσης $\phi < 1$ και φαίνεται χαρακτηριστικά στα Σχήματα 4.1. με 4.3., έχουμε την ύπαρξη μίας κωνικής σταθεροποιημένης συστρεφόμενης φλόγας (swirl – stabilized flame), η δομή της οποίας δεν επηρεάζεται σημαντικά από την τύρβη. Αυξανόμενη της στοιχειομετρίας (π.χ. Σχήμα 4.4., φωτογραφία 001) η φλόγα τείνει να επιμηκυνθεί κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της και να διογκωθεί ακτινικά παρουσιάζοντας χαρακτηριστικούς λοβούς, στην προσπάθειά της να βρει αέρα. Αύξηση της τύρβης και του λόγου μεθανίου – αέρα οδηγεί σε τοπική απόσβεση (extinction) κοντά στο στόμιο του καυστήρα και σχηματισμό υπερυψωμένης (lifted) φλόγας μερικής προανάμειξης, η οποία τείνει να σταθεροποιηθεί στην περιοχή της ροής, όπου η ταχύτητα της ροής ισούται με την ταχύτητα καύσης (π.χ. Σχήμα 4.6., φωτογραφία 046). Η τελευταία περιοχή αφορά τυρβώδεις φλόγες διάχυσης, όπως χαρακτηριστικά φαίνονται στα Σχήματα 4.8. - 4.13.

4.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ

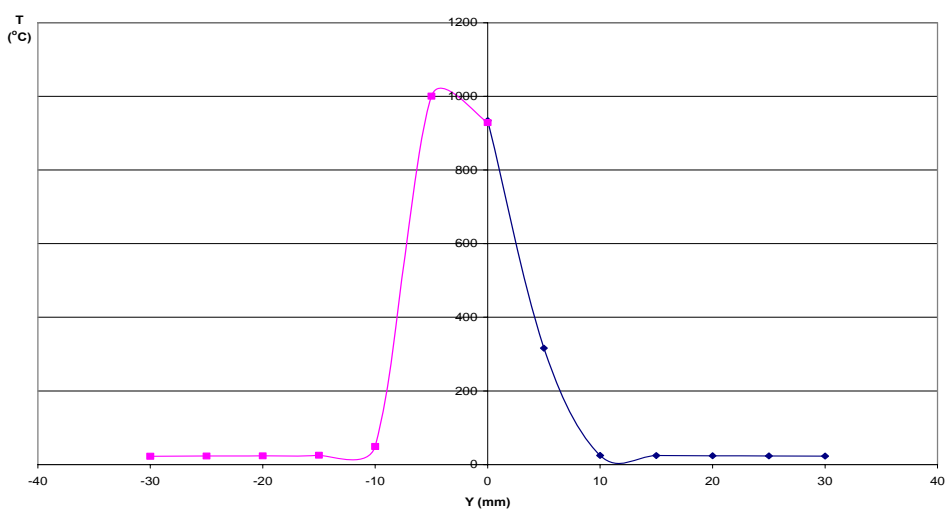
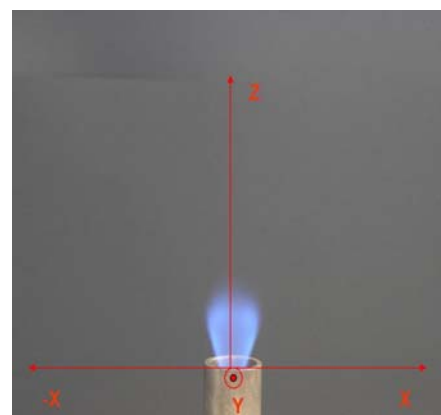
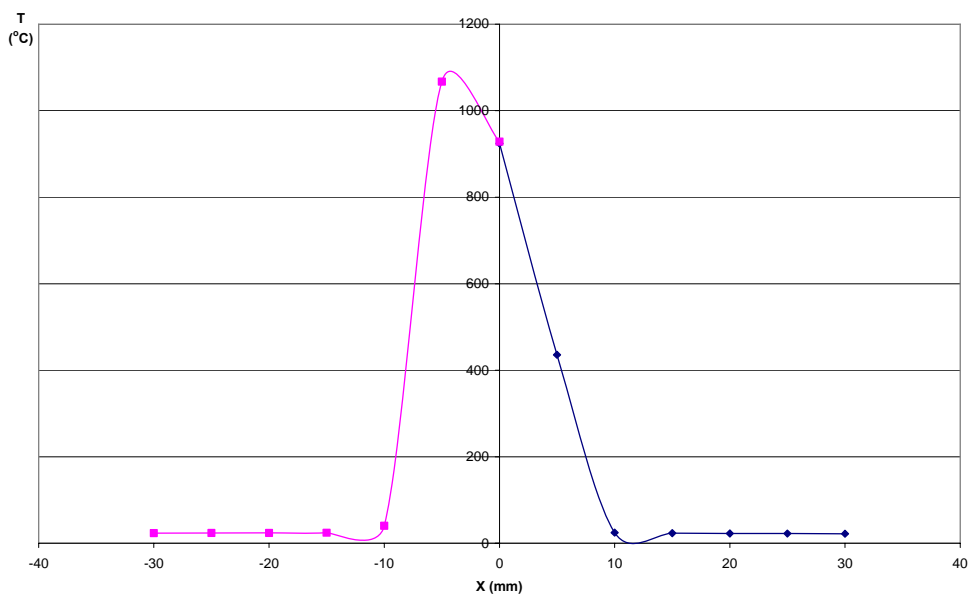
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται μετρήσεις θερμοκρασίας σε επιλεγμένες φλόγες του καυστήρα συστροφής. Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε επίπεδο παράλληλο με την έξοδο του καυστήρα και κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της φλόγας και παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.14. – 4.22.



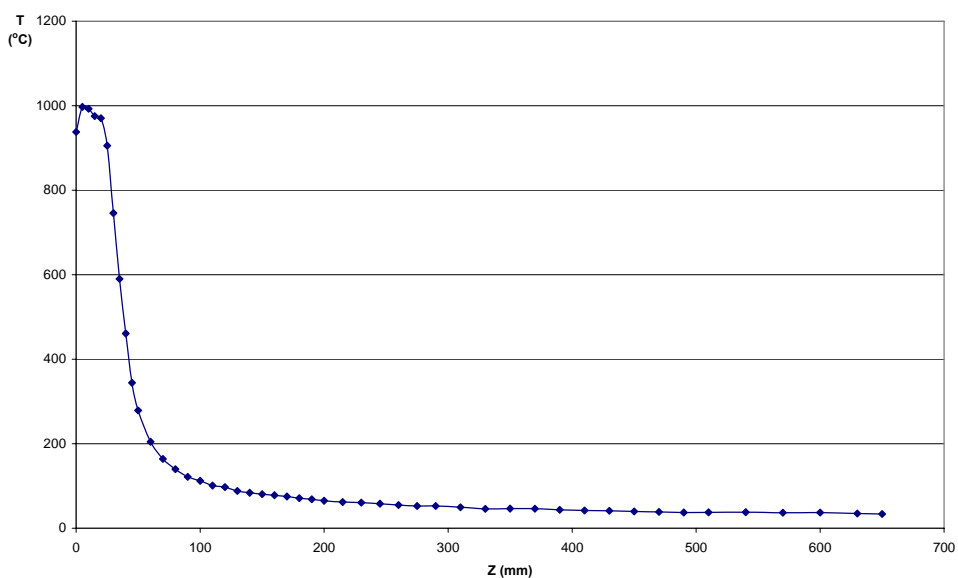
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	15,0 lt / min
Q_a	357,0 lt / min
ϕ	0,4



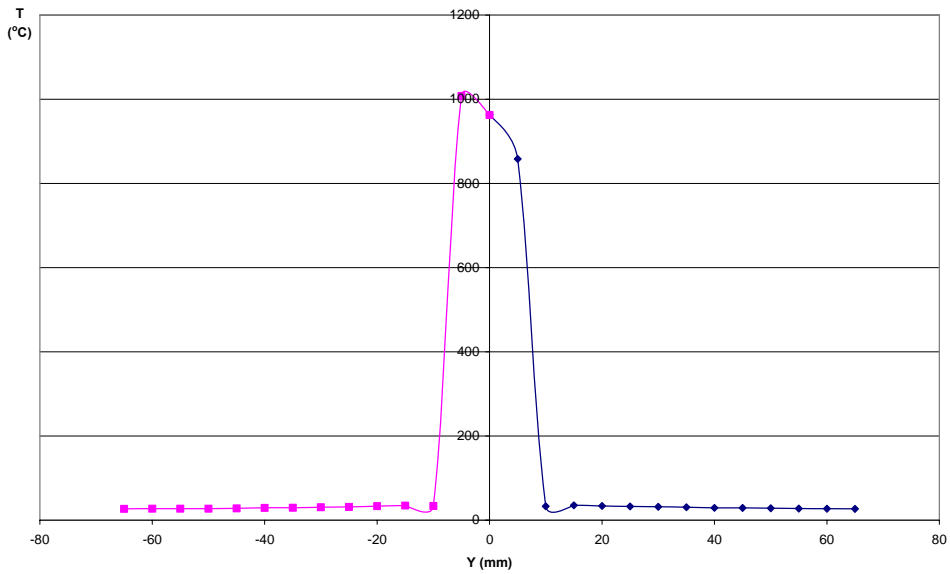
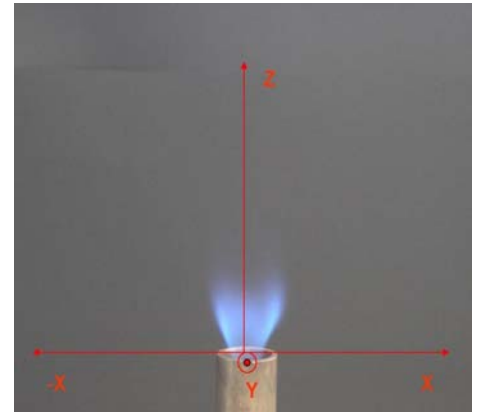
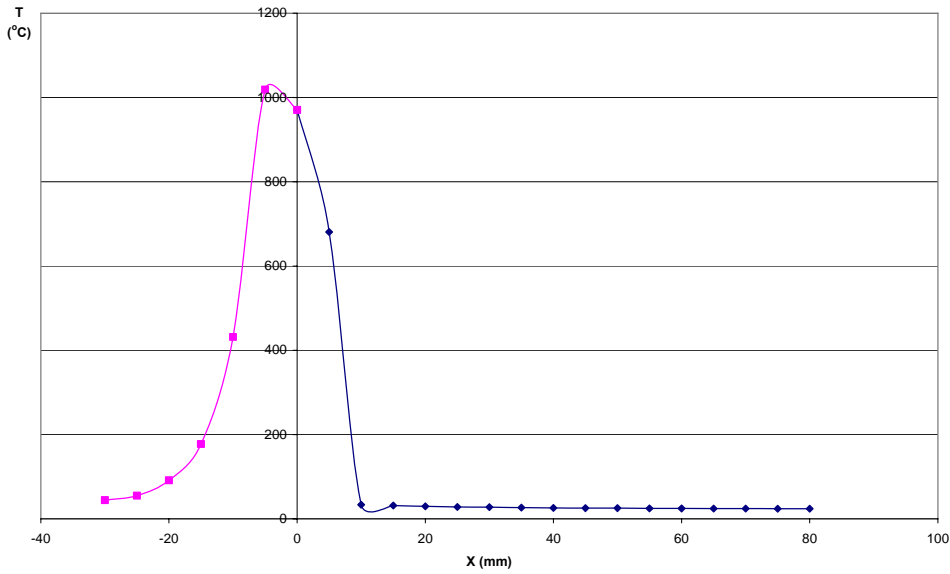
Σχήμα 4.14. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 194.



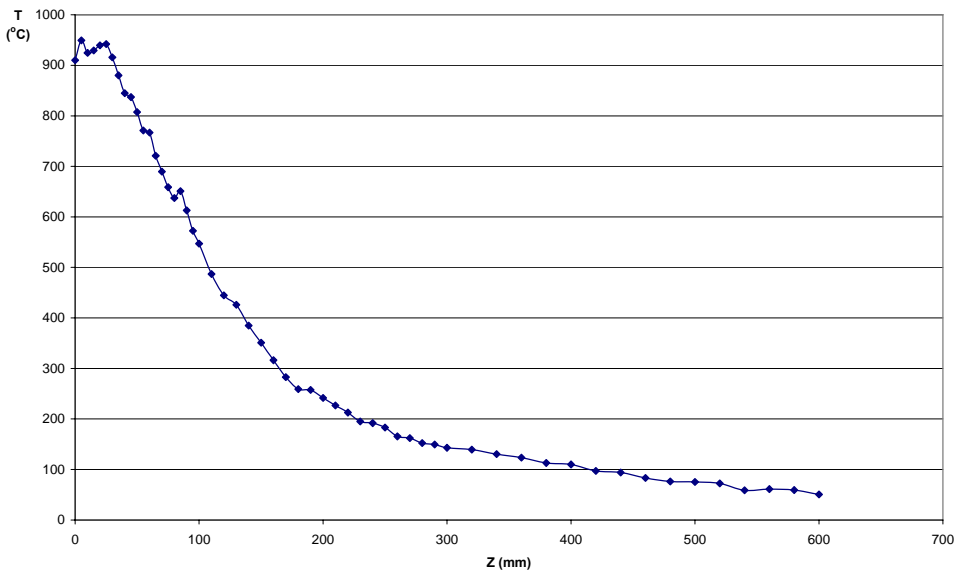
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	23,0 lt / min
Q_a	364,9 lt / min
φ	0,6



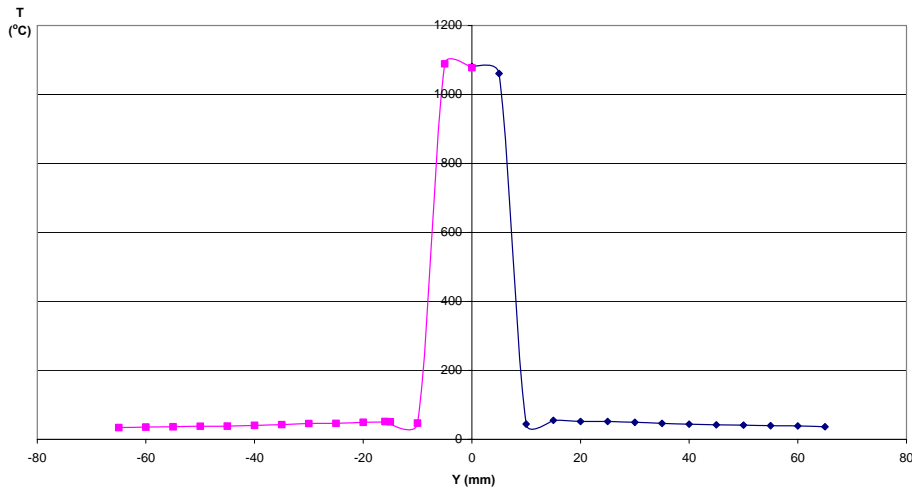
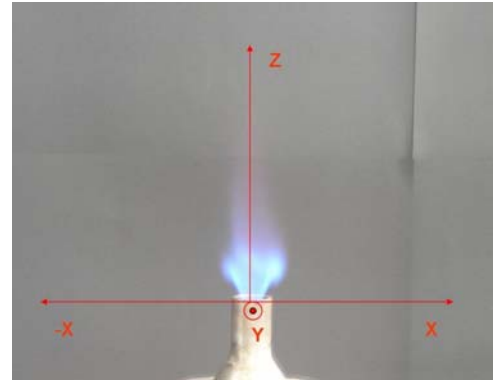
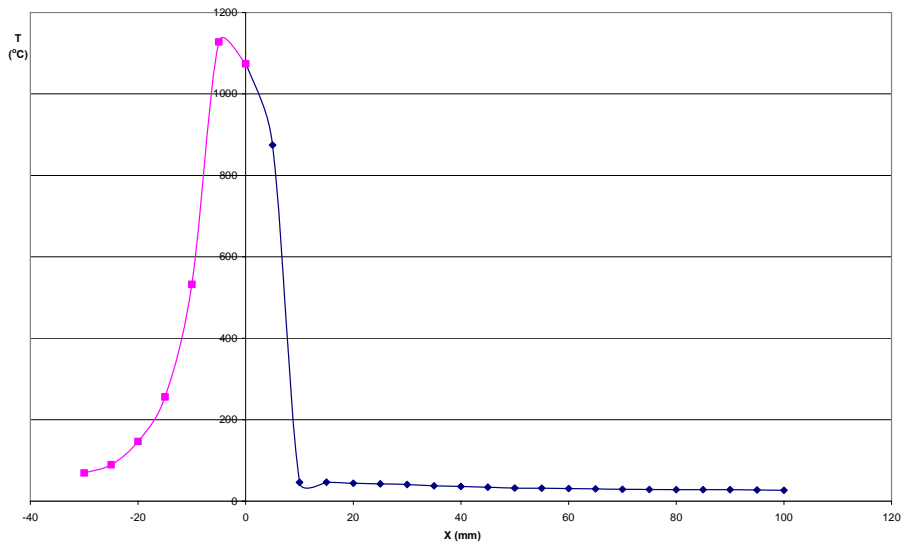
Σχήμα 4.15. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 184.



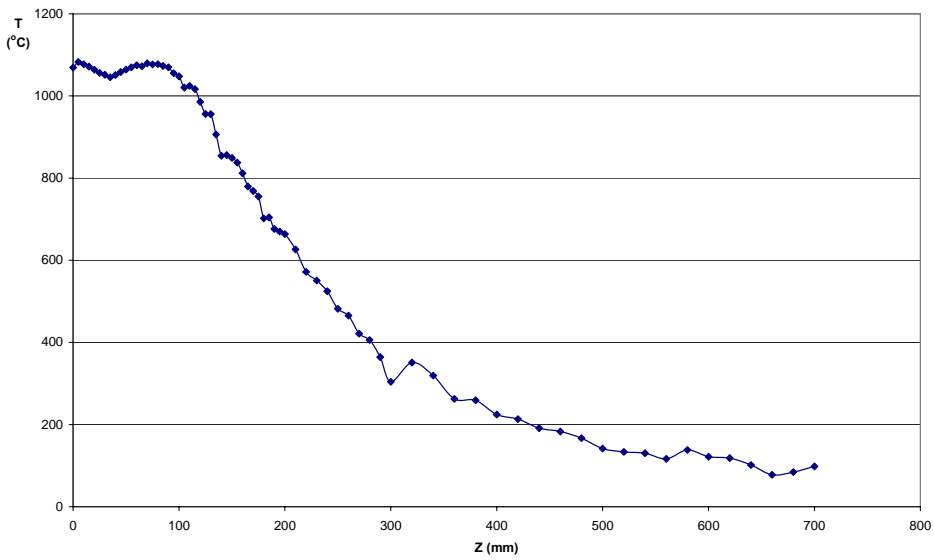
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	79,3 lt / min
φ	0,6



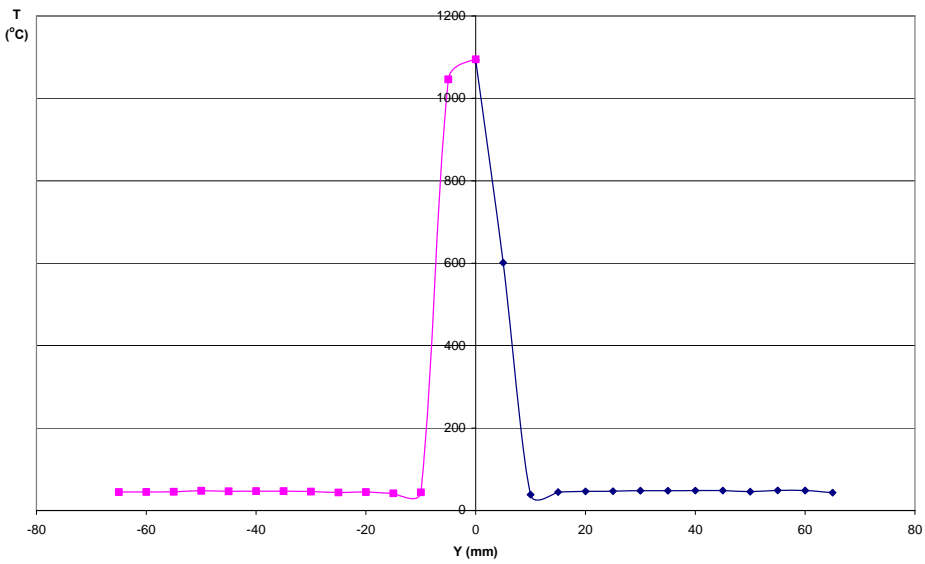
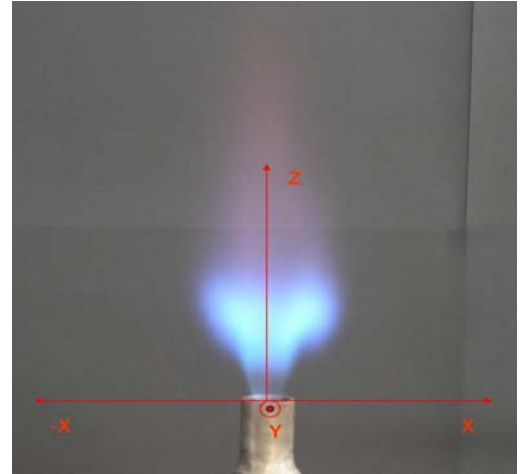
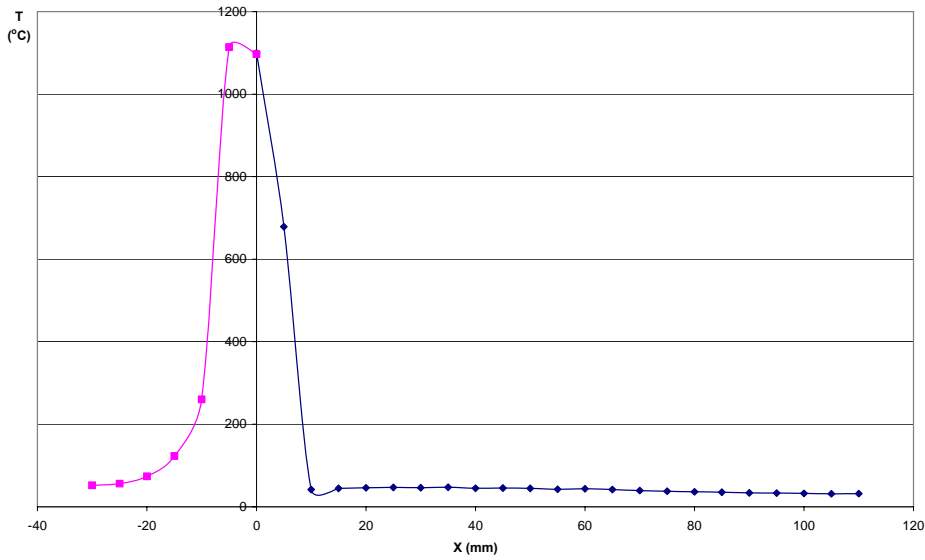
Σχήμα 4.16. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T (°C) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 175.



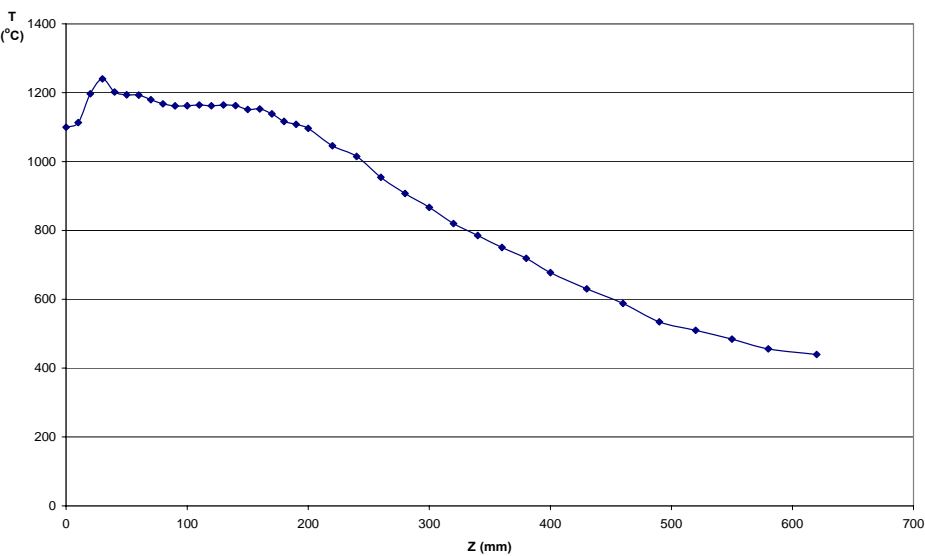
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	47,6 lt / min
φ	1



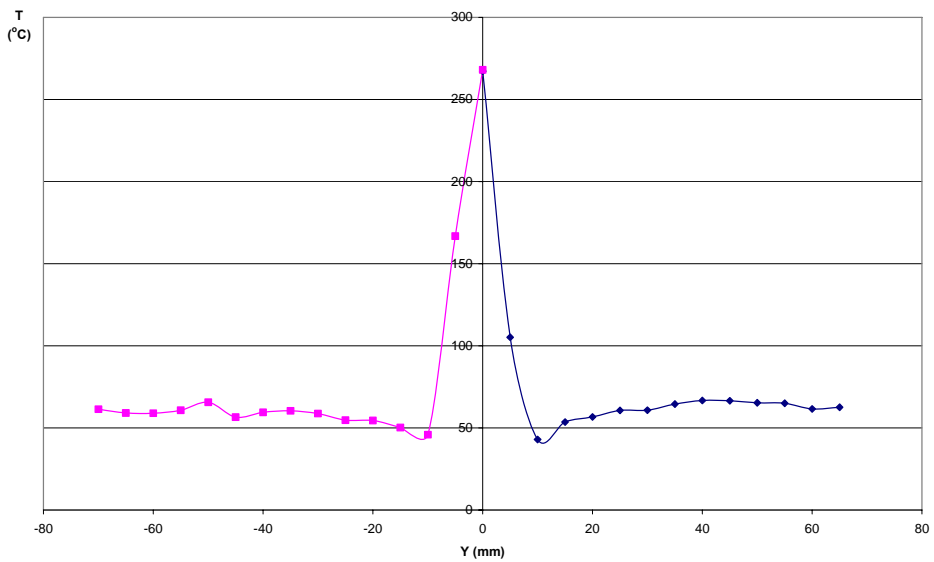
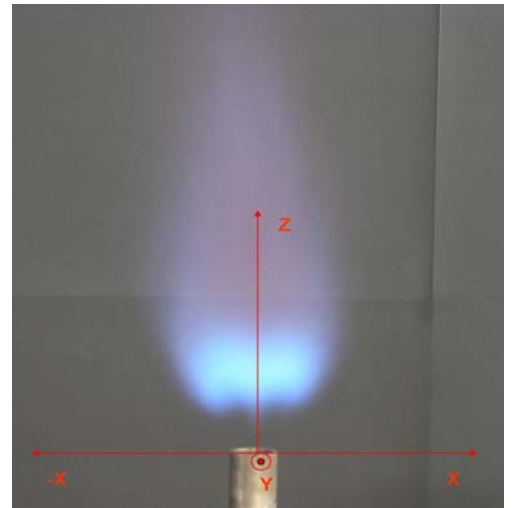
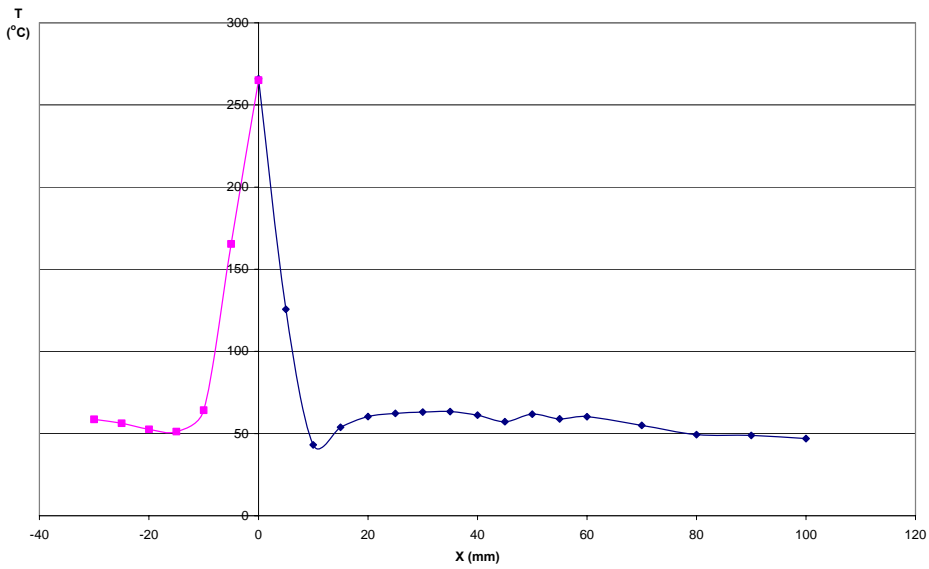
Σχήμα 4.17. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 001.



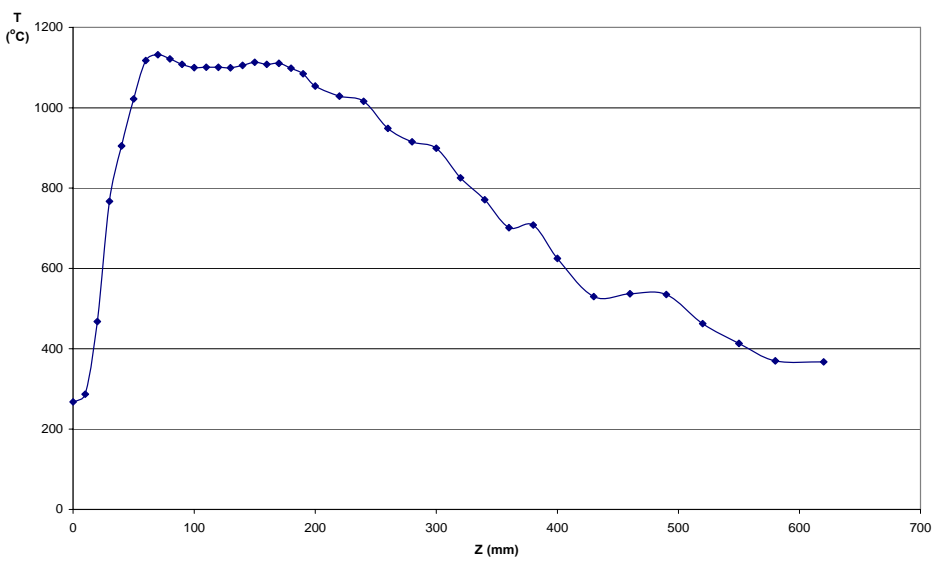
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	31,0 lt / min
Q_a	147,6 lt / min
φ	2



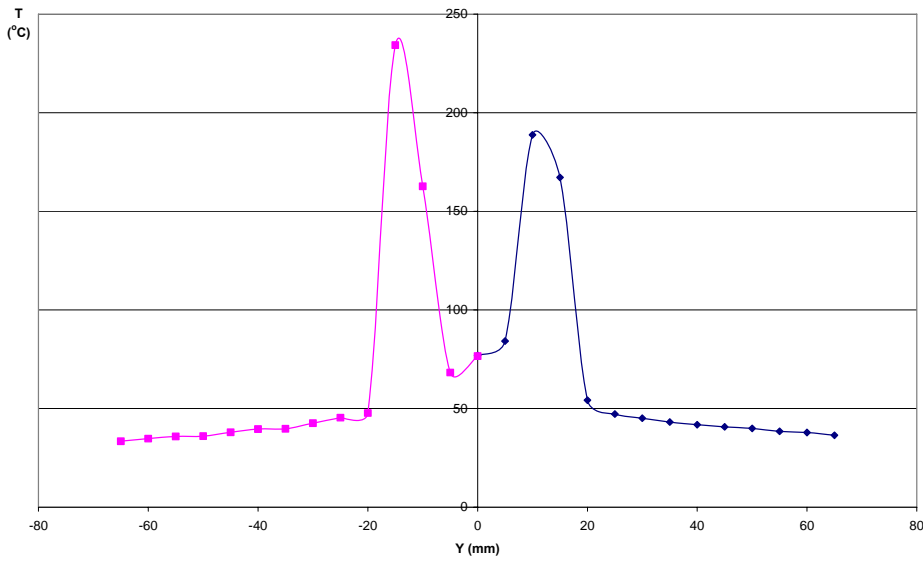
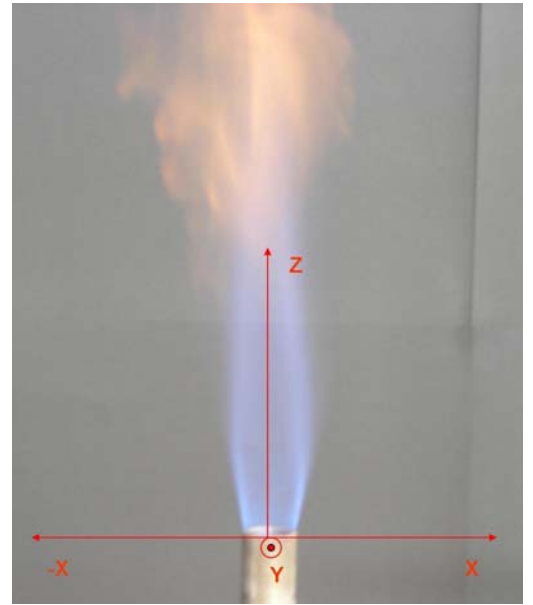
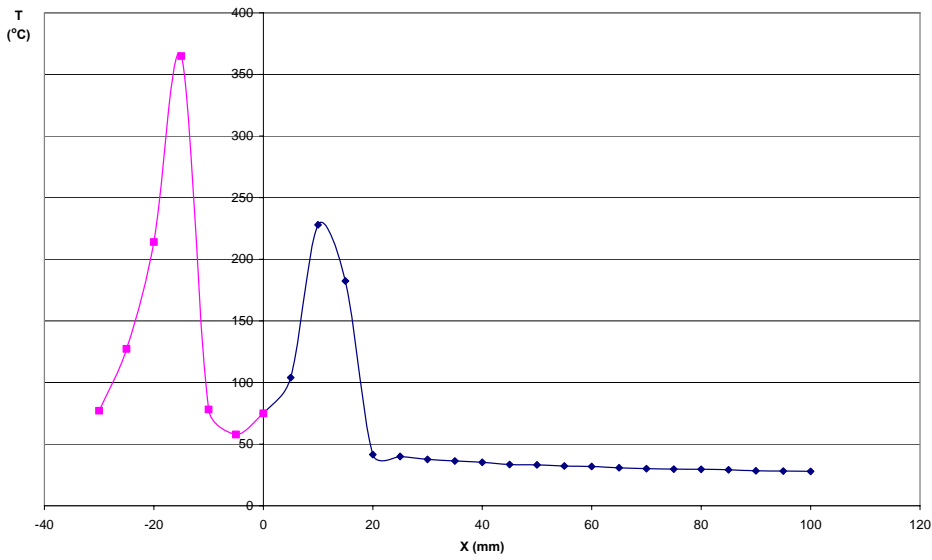
Σχήμα 4.18. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 030.



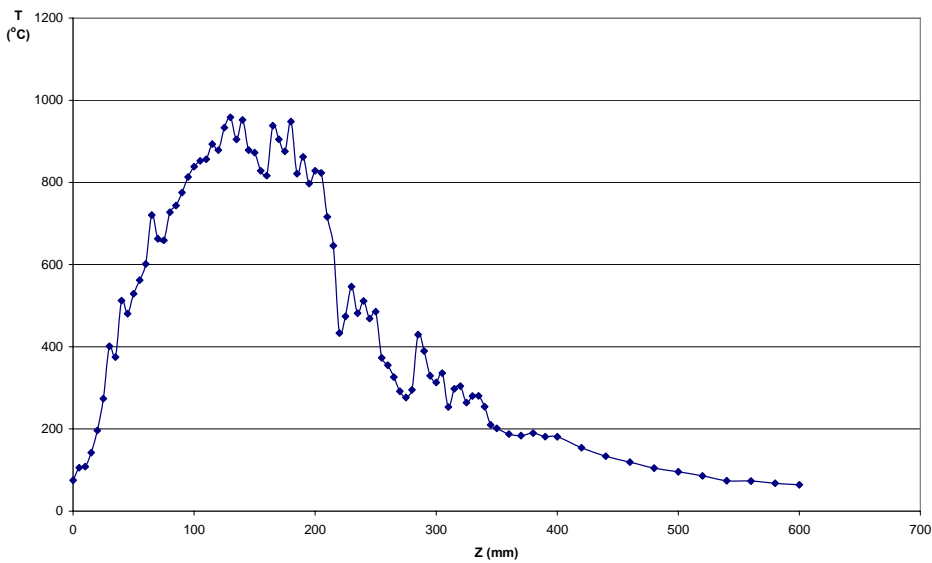
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	35,0 lt / min
Q_a	111,1 lt / min
ϕ	3



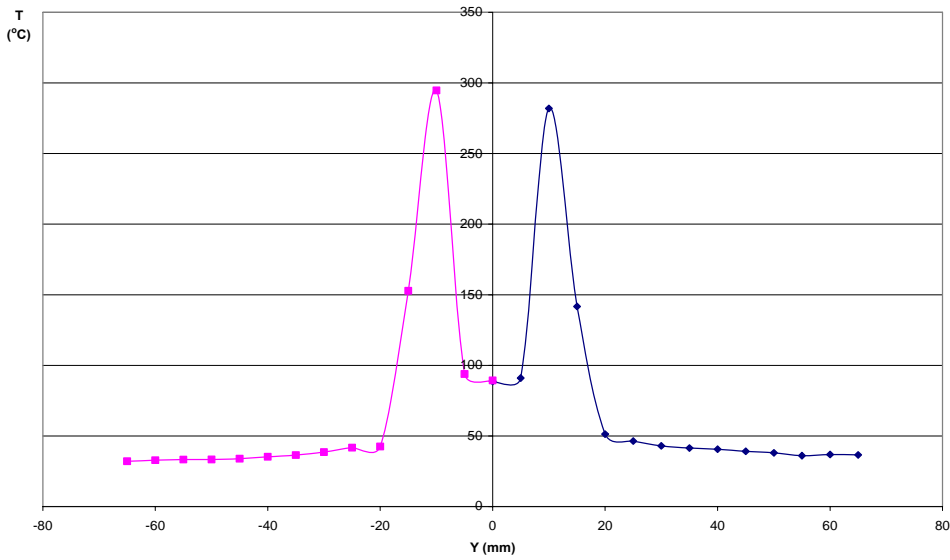
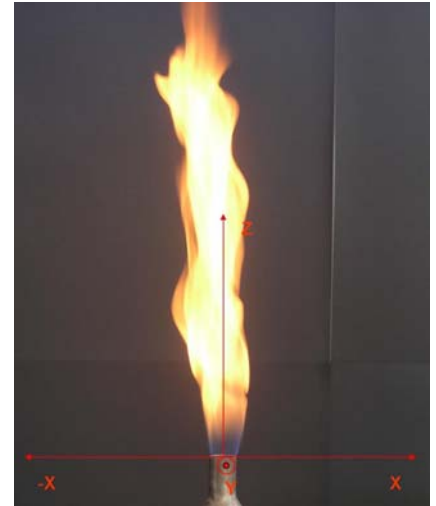
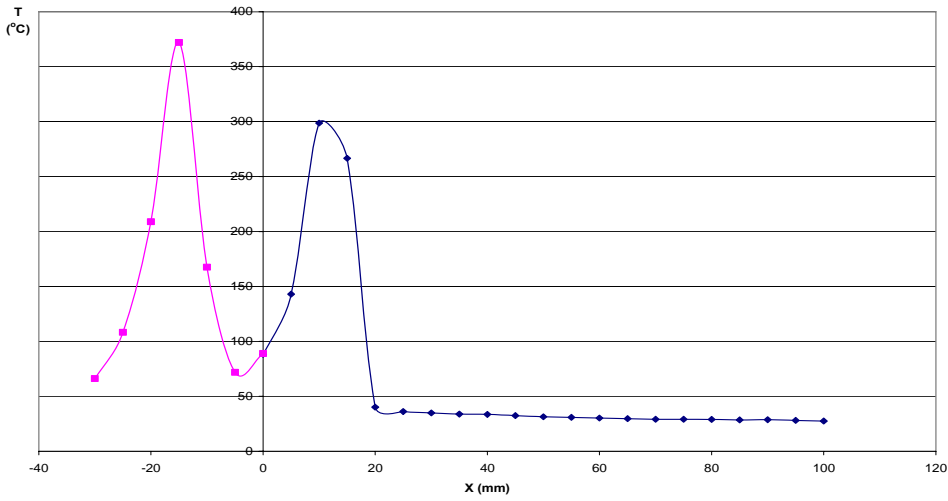
Σχήμα 4.19. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 048.



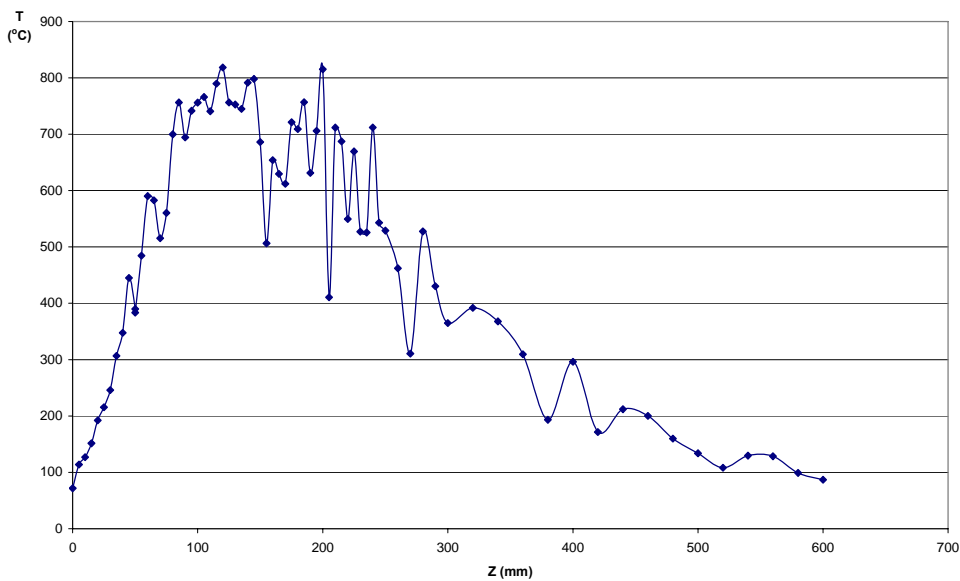
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	15,9 lt / min
φ	3



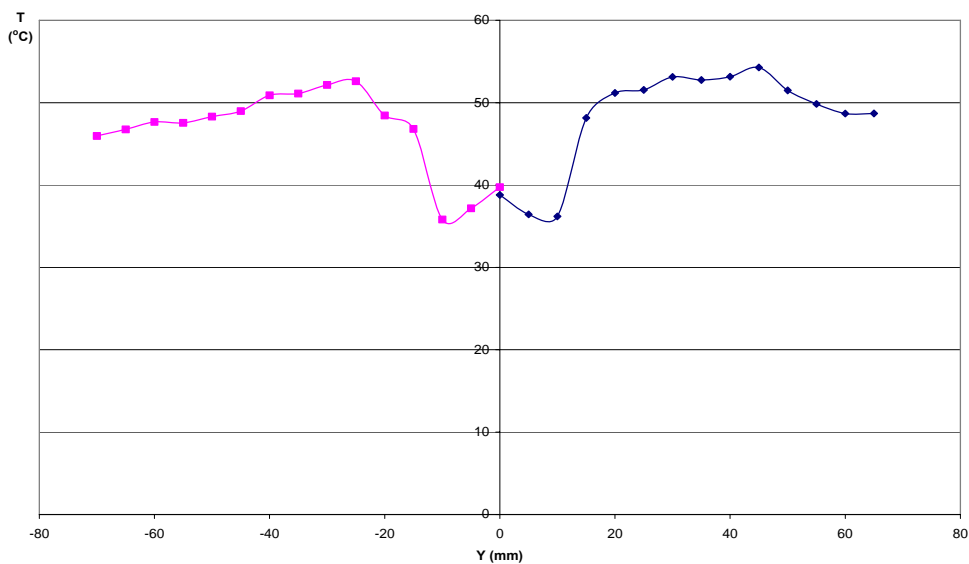
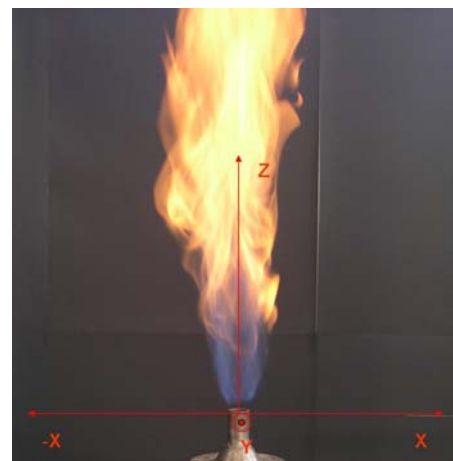
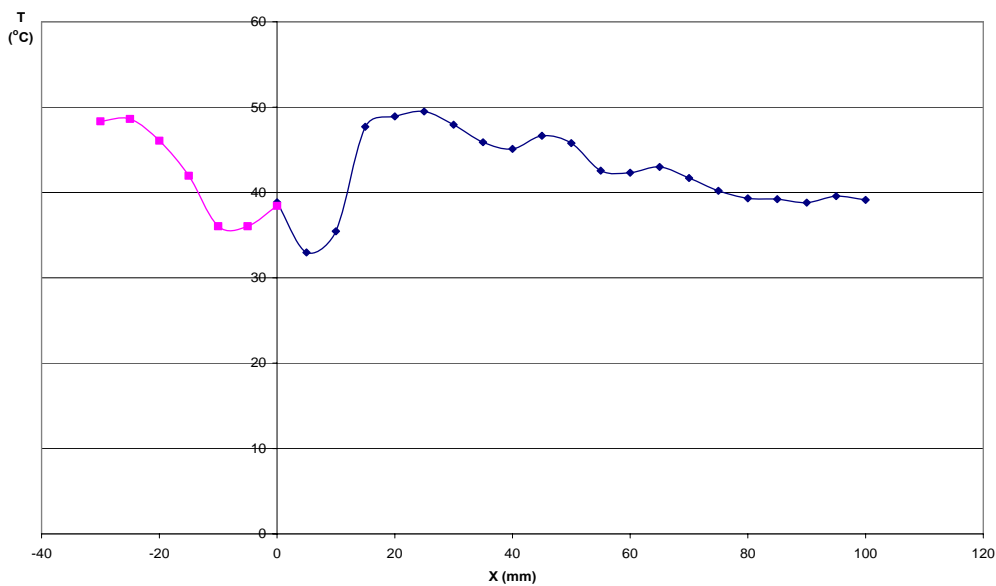
Σχήμα 4.20. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 033.



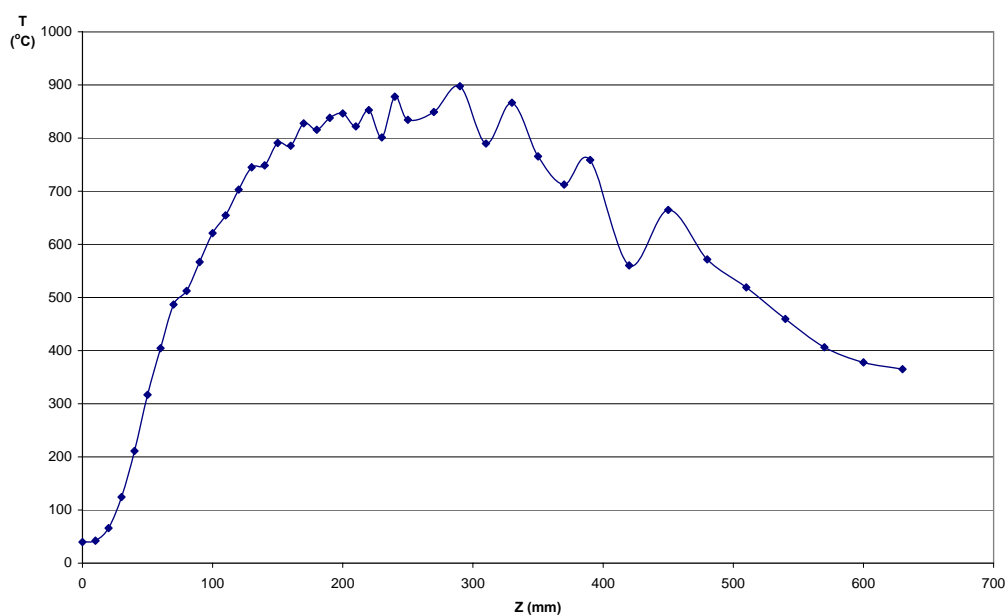
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	4,8 lt / min
φ	10



Σχήμα 4.21. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T (°C) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 145.



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	35,0 lt / min
Q_a	33,3 lt / min
φ	10



Σχήμα 4.22. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) κατά μήκος των αξόνων (α) XX' , (β) YY' και (γ) ZZ' για τις συνθήκες της φωτογραφίας 160.

Η ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με την δομή της φλόγας. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.14. – 4.18., στην περίπτωση της σταθεροποιημένης συστρεφόμενης φλόγας (swirl – stabilized flame) η καύση αρχίζει μέσα στο ακροφύσιο, αφού η θερμοκρασία που μετρήθηκε στην αρχή των αξόνων και στις πέντε περιπτώσεις είναι κοντά στους 1000 °C. Στα ίδια σχήματα παρατηρείται χαρακτηριστική ασυμμετρία στις κατανομές θερμοκρασίας, τόσο στον άξονα XX' όσο και στον άξονα YY', η οποία και υποδηλώνει μία αντίστοιχη ασυμμετρία ροής.

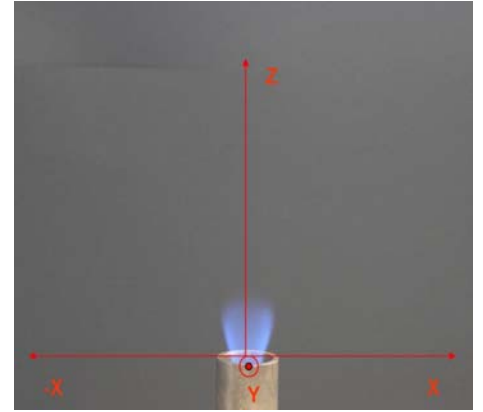
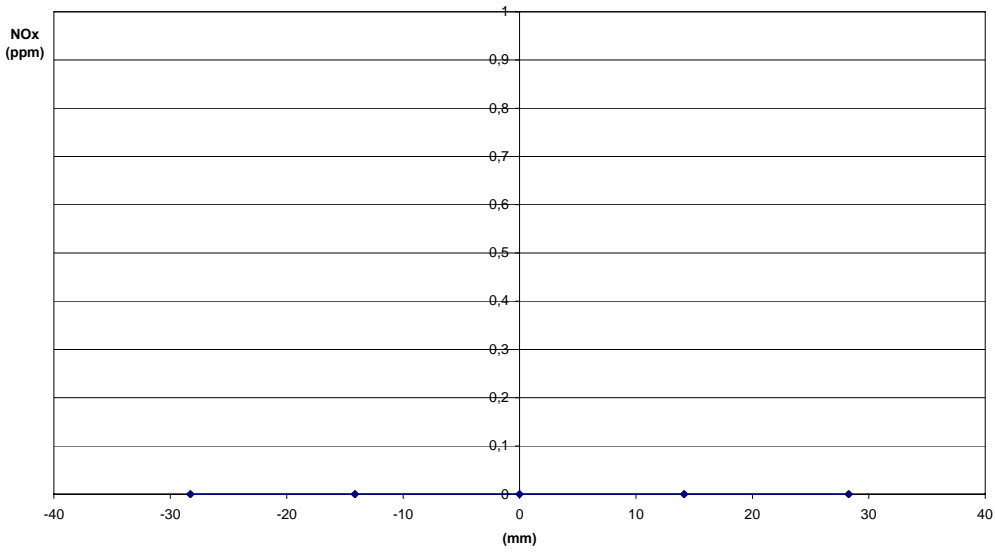
Κατά την μετάβαση της φλόγας από σταθεροποιημένη συστρεφόμενη σε υπερυψωμένη είναι εμφανής η δημιουργία μιας ομοιογενούς περιοχής λίγο πάνω από το στόμιο του καυστήρα όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.17. και 4.18. όπου για τα πρώτα 100 mm η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και ίση με περίπου 1100 °C. Χαρακτηριστικές κατανομές θερμοκρασίας σε υπερυψωμένη φλόγα παρατηρούνται στο Σχήμα 4.19.

Αντίστοιχα χαρακτηριστικές κατανομές σε φλόγα διάχυσης παρατηρούνται στα Σχήματα 4.20. με 4.22., όπου οι θερμοκρασίες καύσης είναι γενικά χαμηλότερες από τις φλόγες προανάμειξης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η φλόγα του Σχήματος 4.20. Η φλόγα προσκολλάται στο στόμιο του καυστήρα έτσι ώστε οι θερμοκρασίες στον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας να είναι μικρότερες από αυτές που βρίσκονται στα 20 mm εκατέρωθεν του κέντρου. Η πιο θερμή περιοχή παρατηρείται κοντά στα 150 mm πάνω από την επιφάνεια του στομίου, όπου οι θερμοκρασίες είναι της τάξεως των 250 °C.

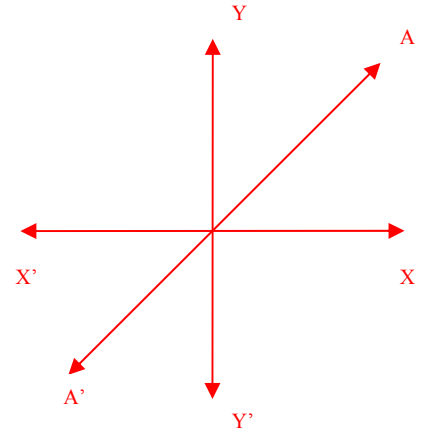
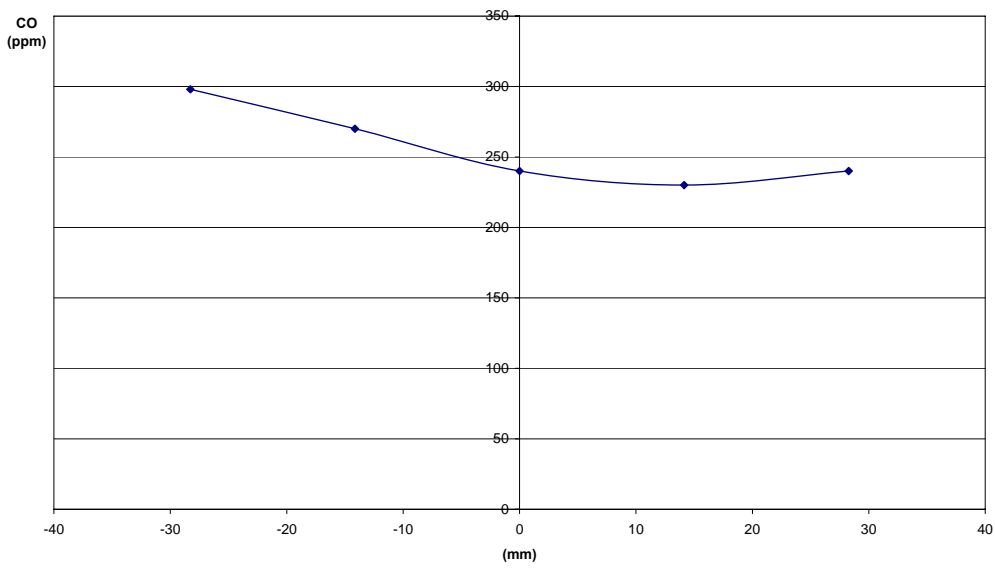
4.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ ΣΤΟΝ ΚΑΥΣΤΗΡΑ ΣΥΣΤΡΟΦΗΣ

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται ποσοτικές μετρήσεις NOx και CO για τις επιλεγμένες φλόγες της παραγράφου 4.2. Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε ύψος τουλάχιστον 110 mm πάνω από το στόμιο του καυστήρα, έτσι ώστε να διασφαλισθούν θερμοκρασίες χαμηλότερες των 650 °C που είναι και το όριο λειτουργίας του πιστολιού του αναλυτή καυσαερίων. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών οι εκπομπές NOx είναι αμελητέες, φτάνοντας ένα μέγιστο της τάξεως των 6 ppm. (Σχήμα 4.27.)

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=240 (mm)

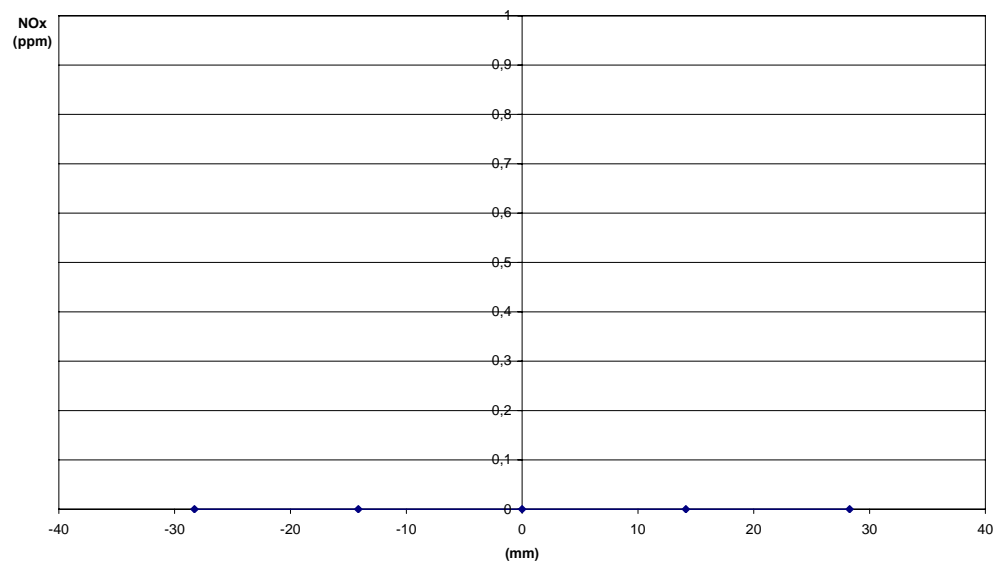


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=240 (mm)

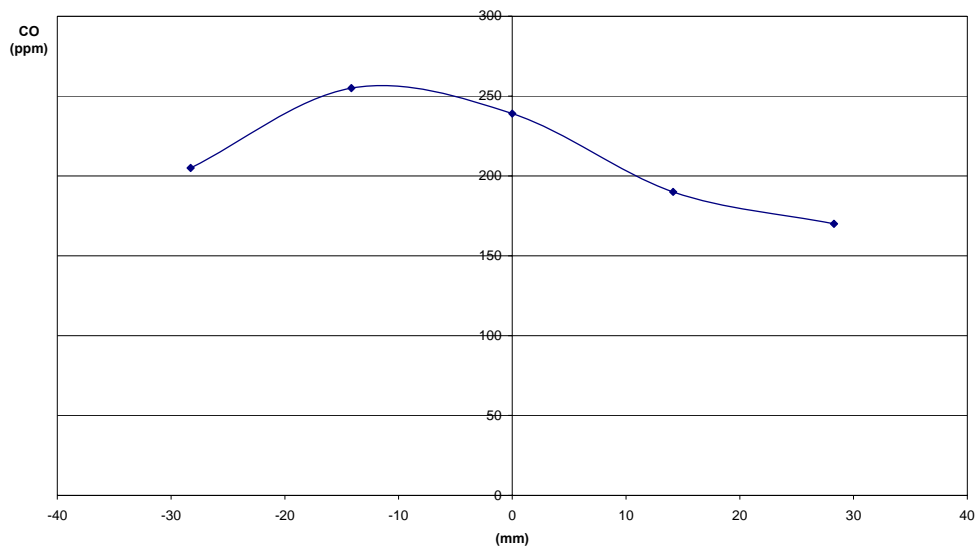


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	15,0 lt / min
Q_a	357,0 lt / min
ϕ	0,4

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=320 (mm)

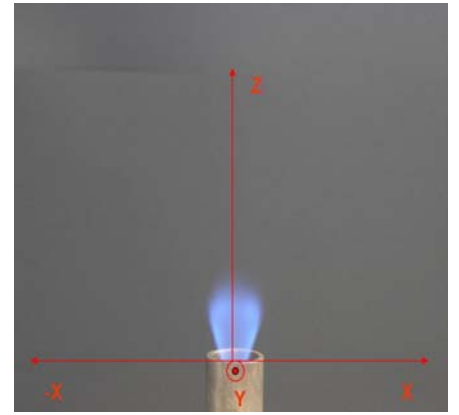
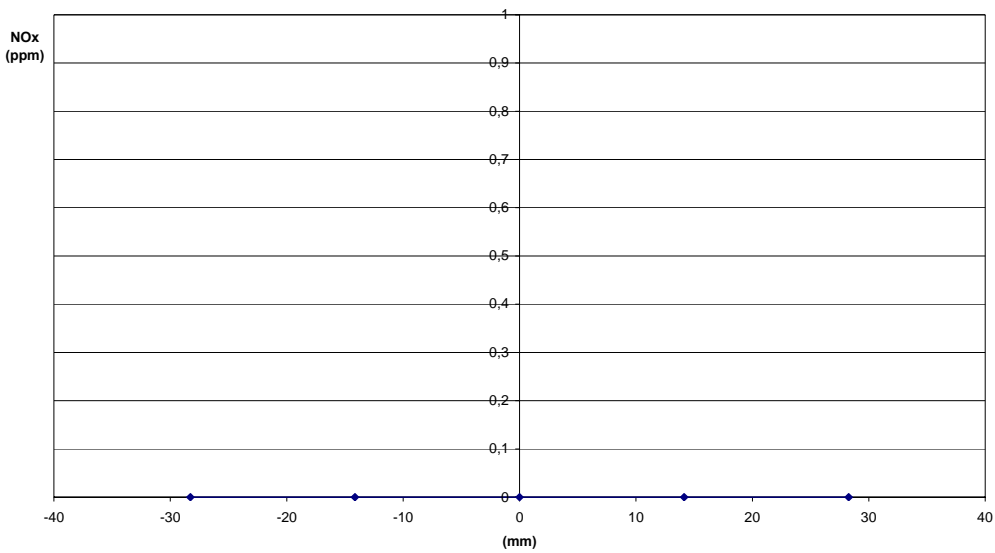


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=320 (mm)

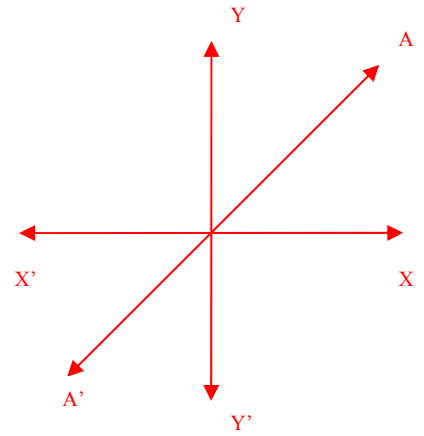
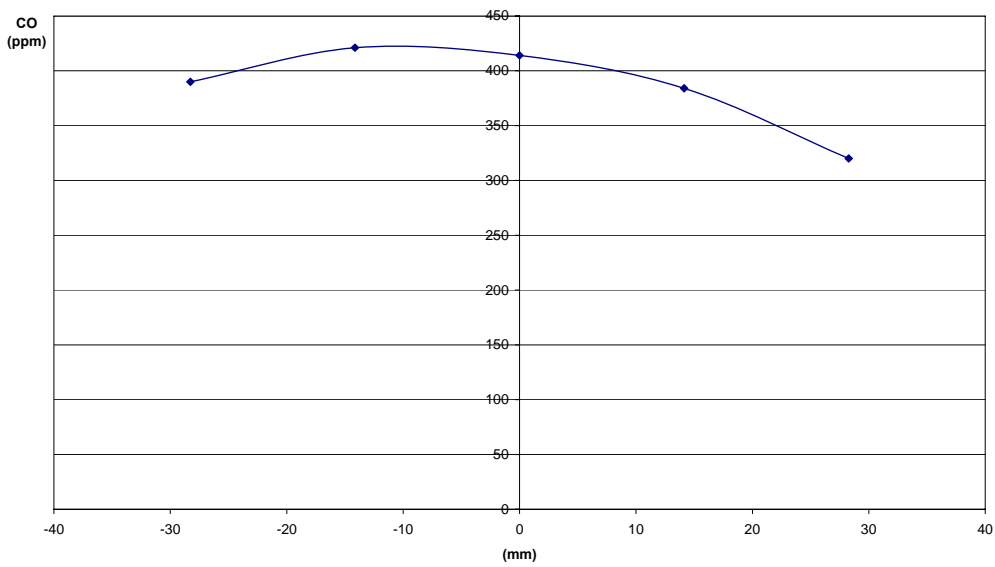


Σχήμα 4.23. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 194.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=320 (mm)

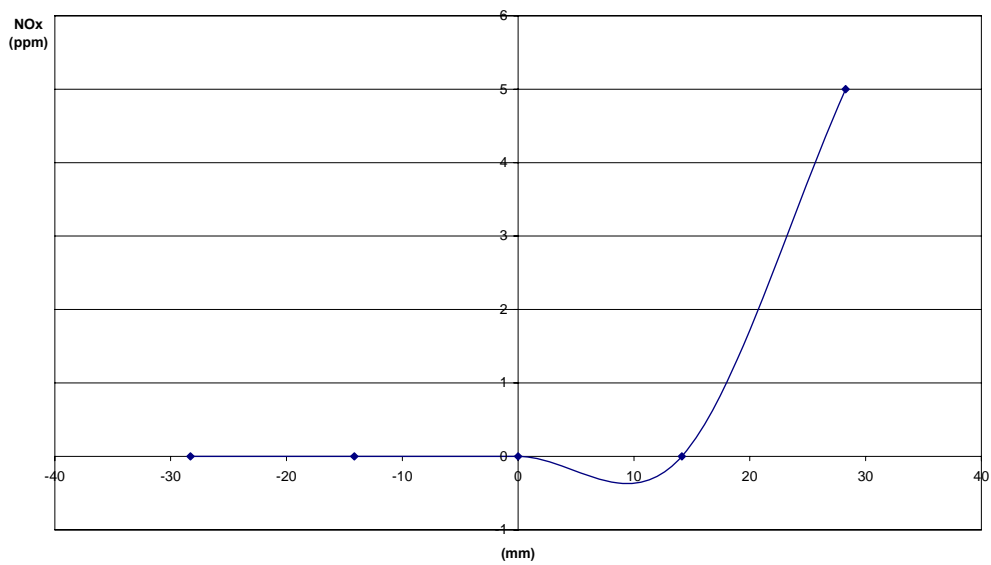


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=320 (mm)

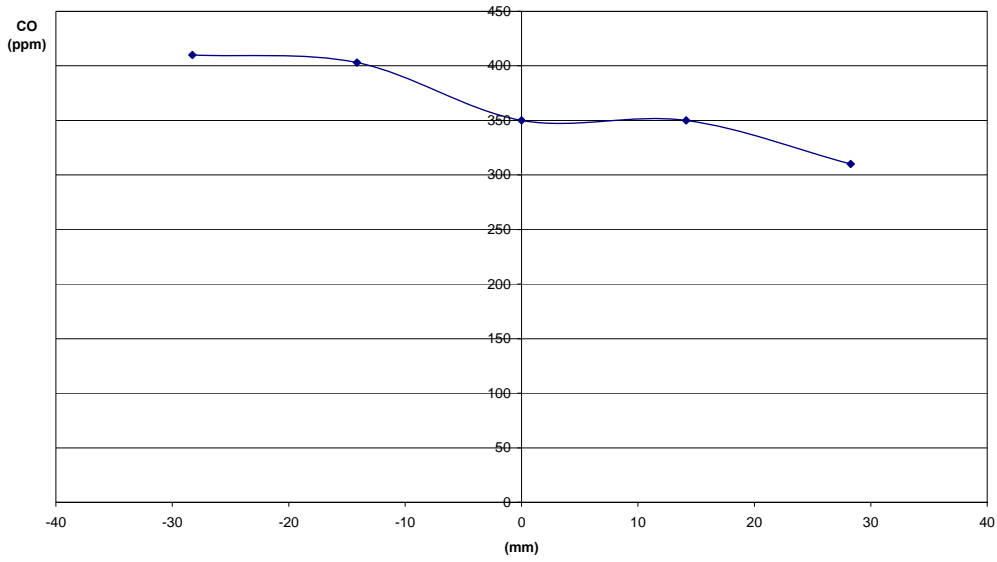


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	23,0 lt / min
Q_a	364,9 lt / min
φ	0,6

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=370 (mm)

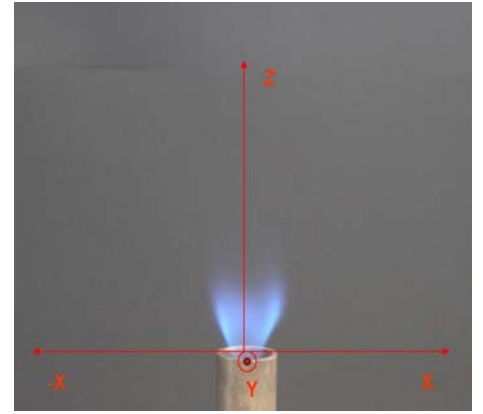
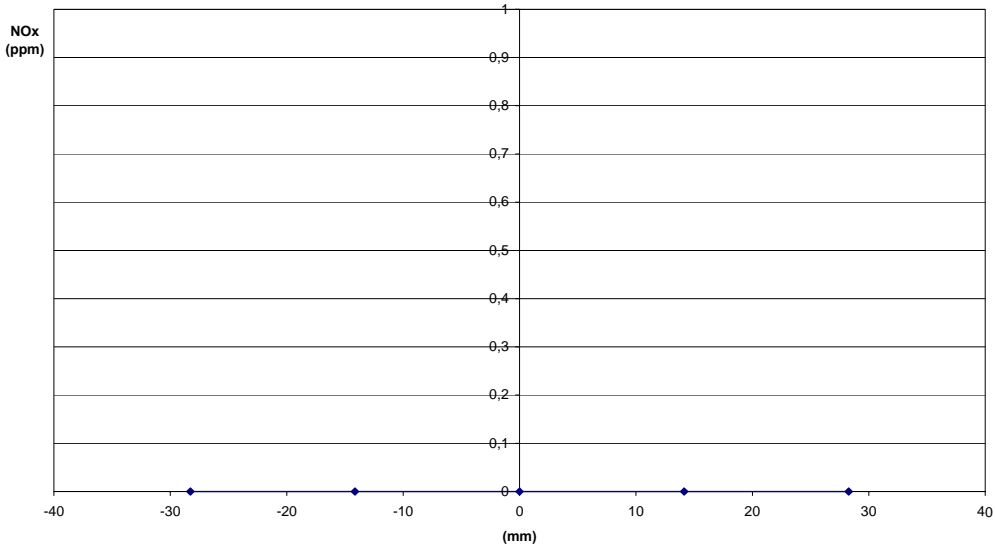


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=370 (mm)

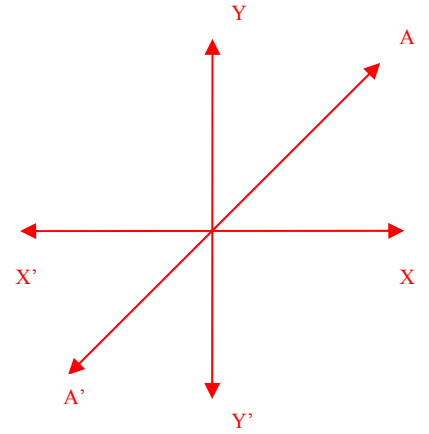
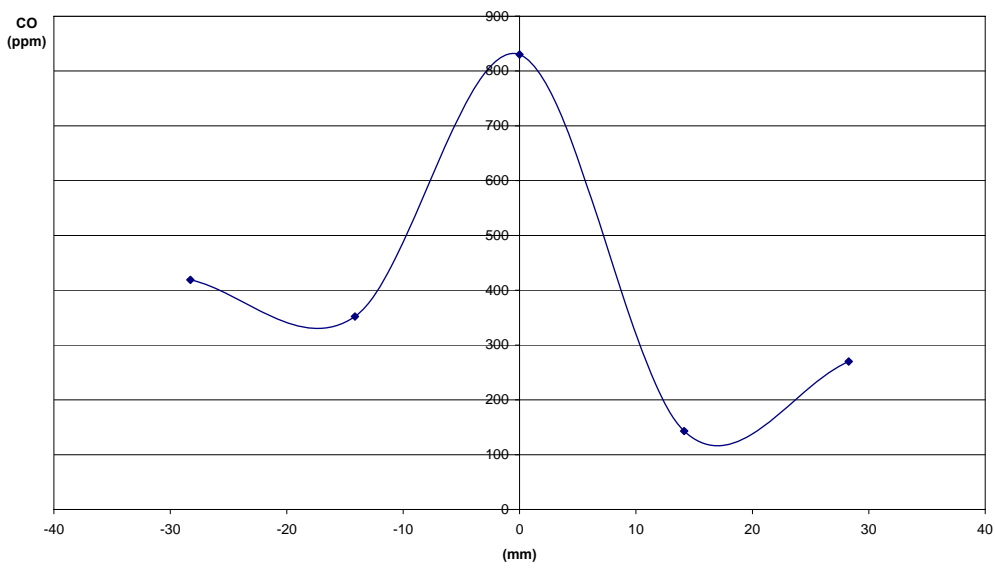


Σχήμα 4.24. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 184.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=110 (mm)

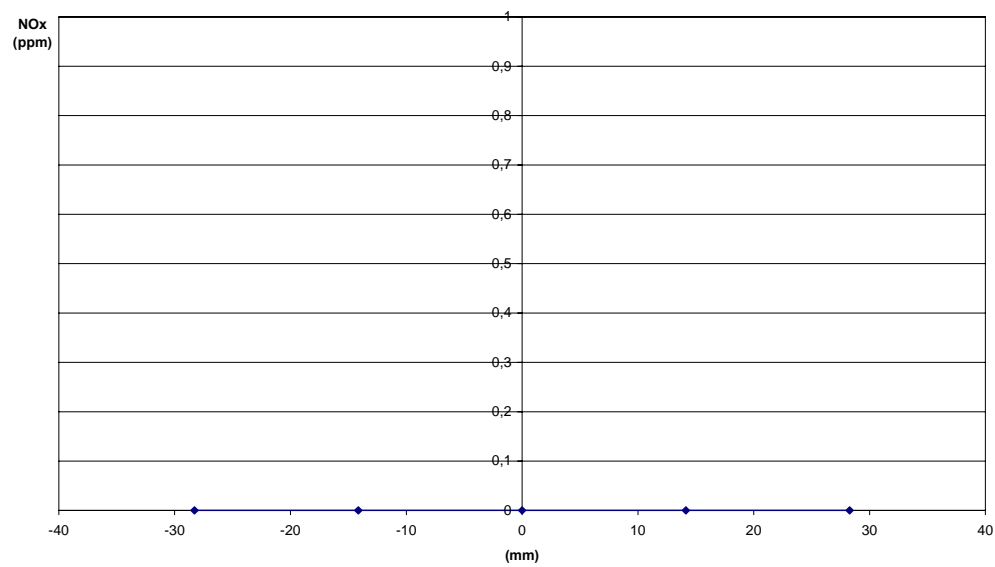


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=110 (mm)

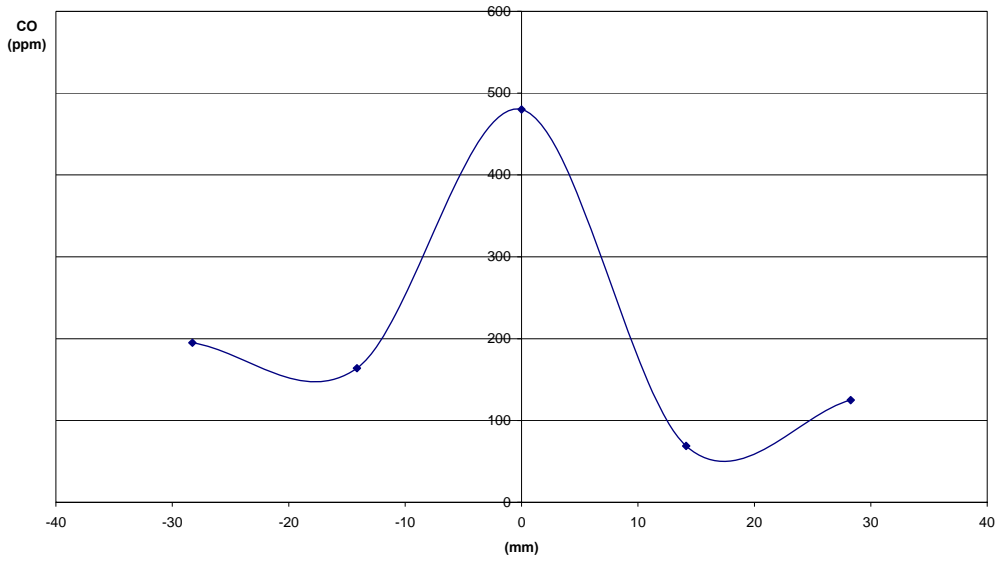


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	79,3 lt / min
ϕ	0,6

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=340 (mm)

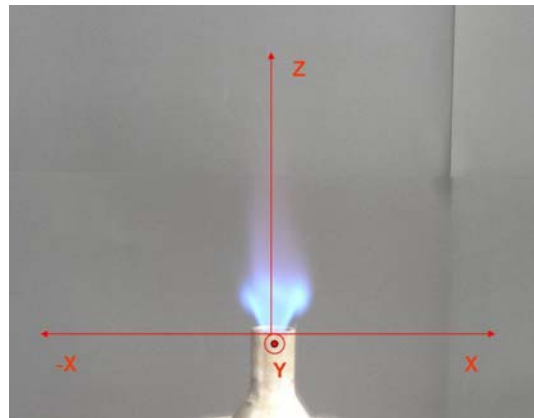
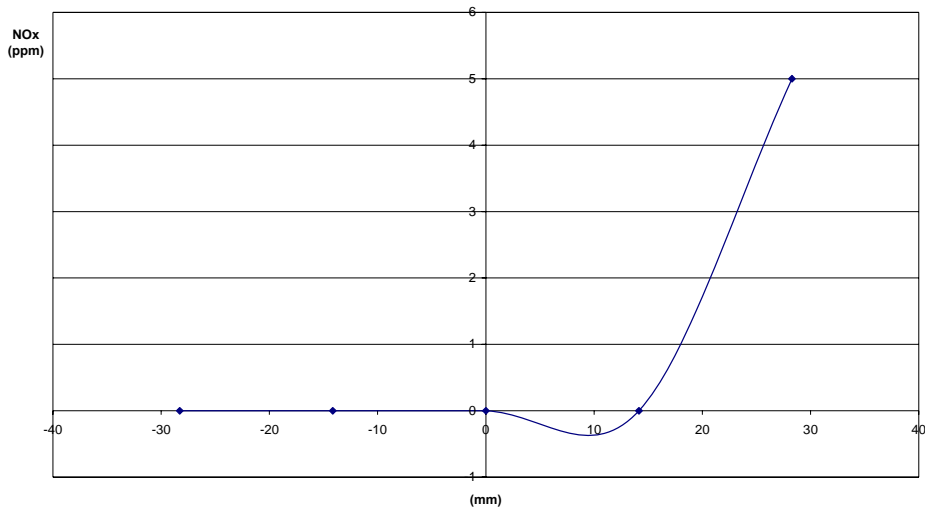


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=340 (mm)

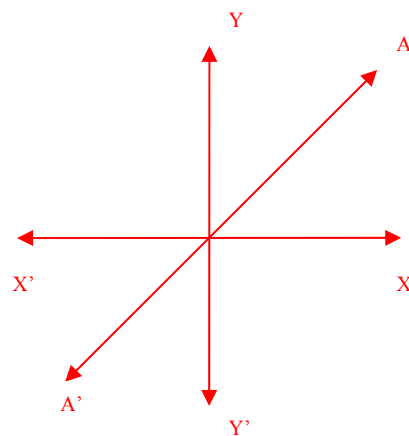
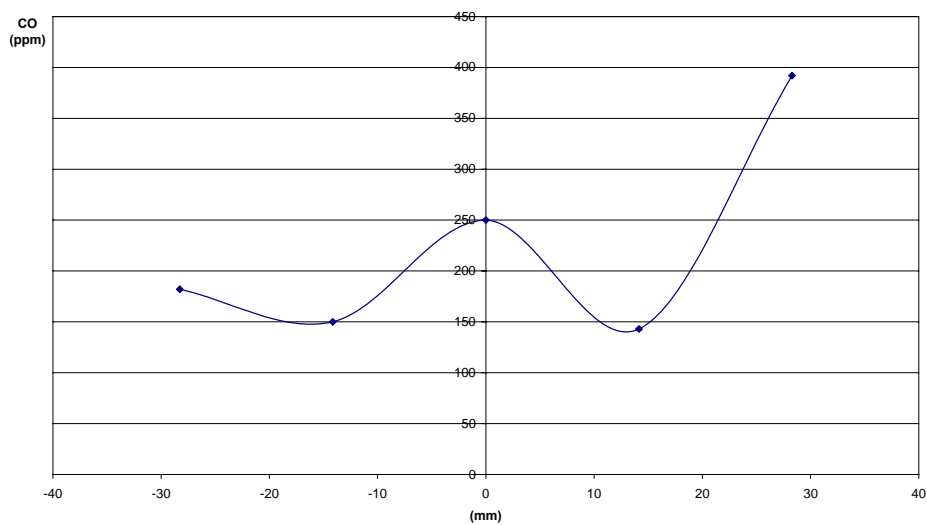


Σχήμα 4.25. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 175.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=200 (mm)

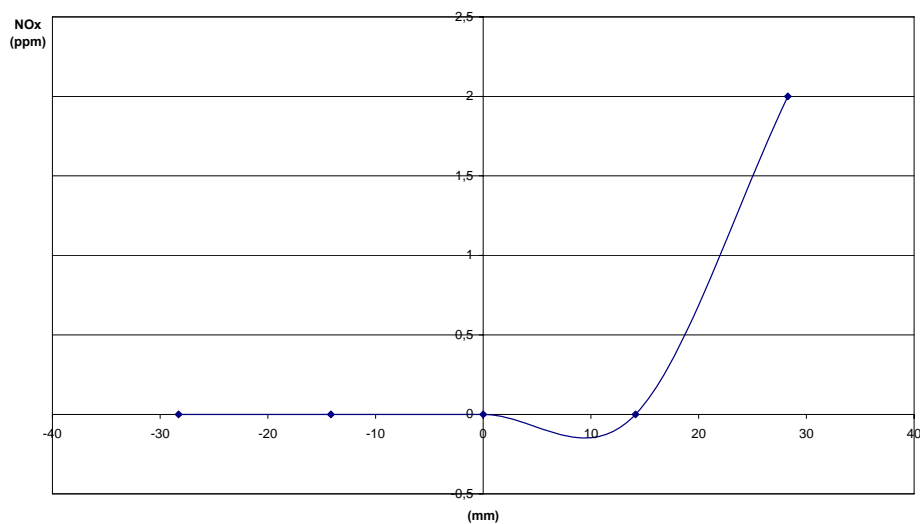


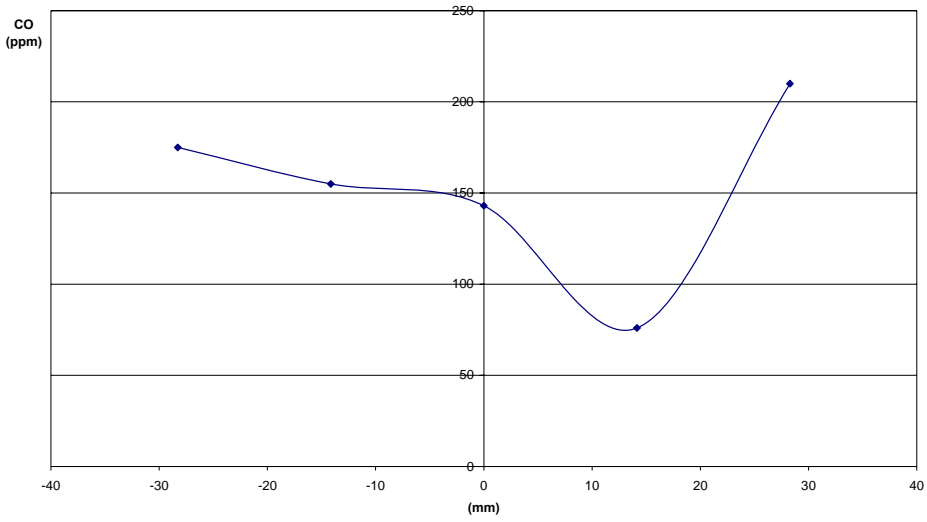
ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=200 (mm)



ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	47,6 lt / min
ϕ	1

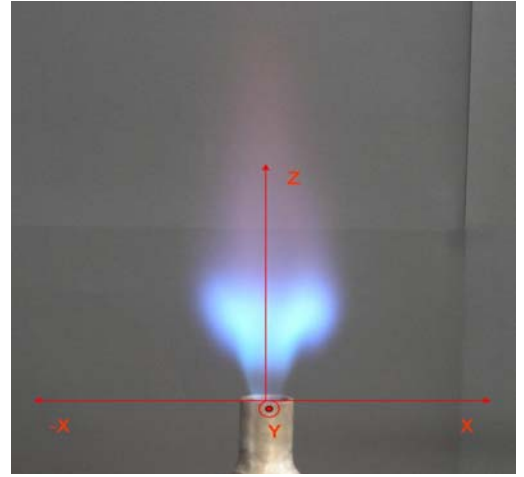
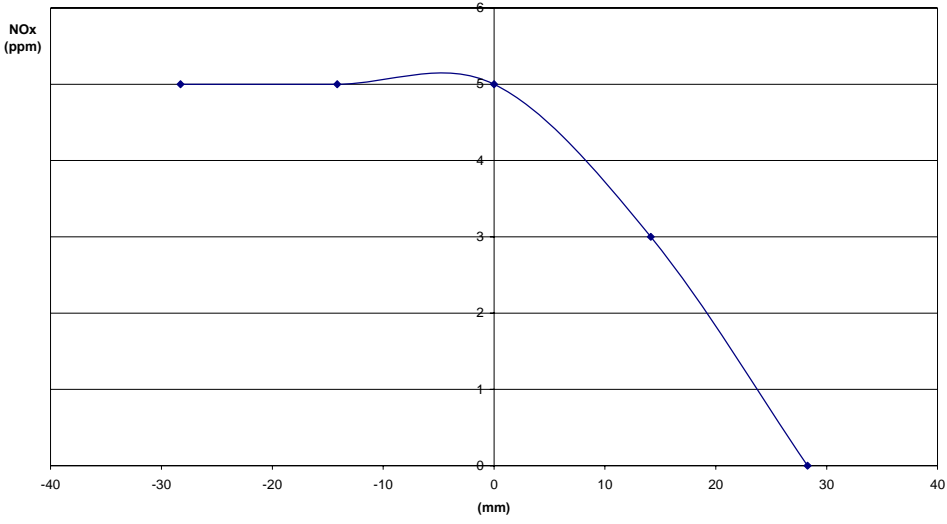
ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=330 (mm)



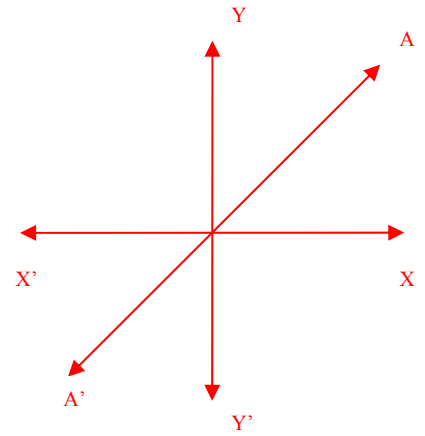
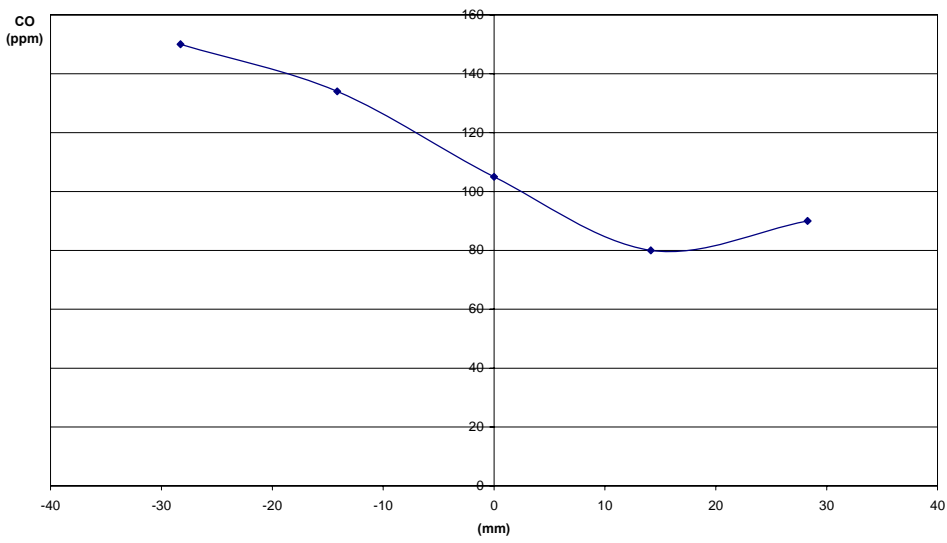


Σχήμα 4.26. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 001.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=470 (mm)

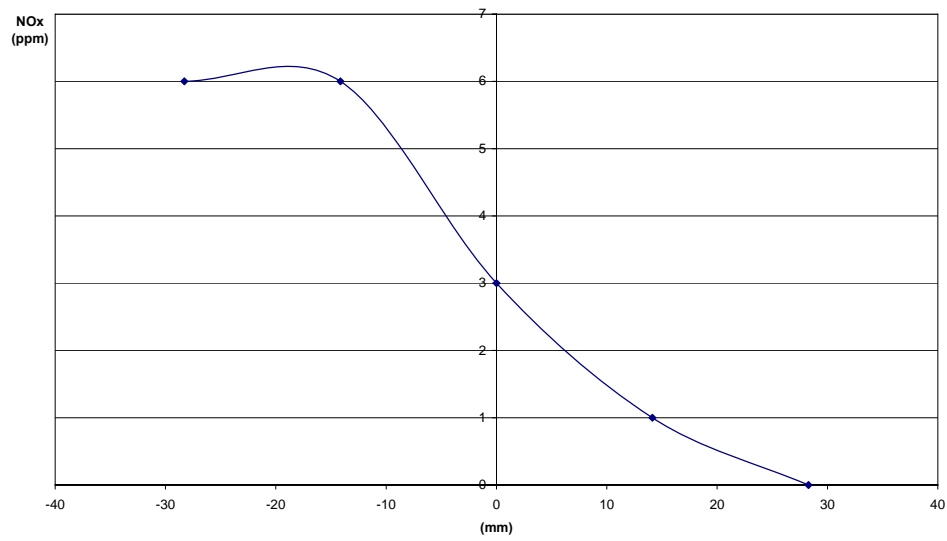


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=470 (mm)

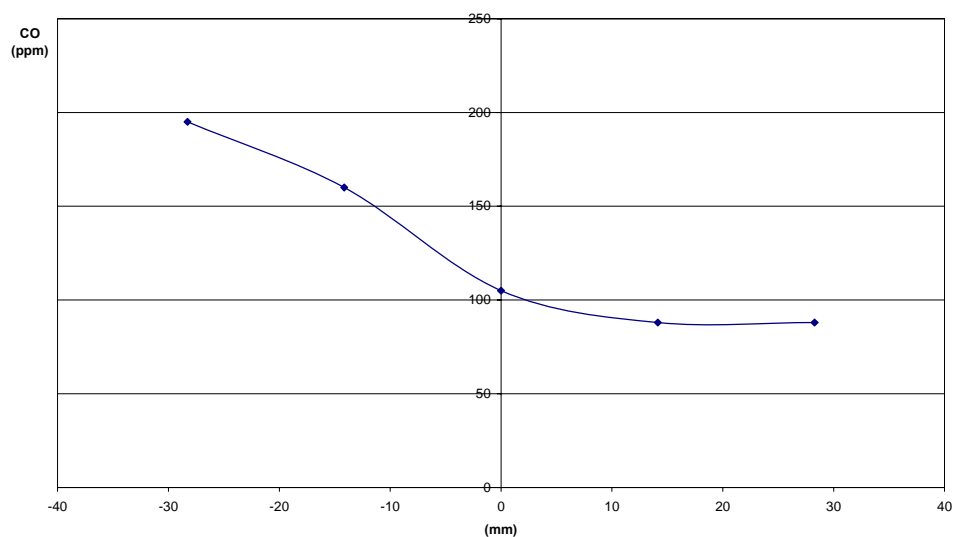


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	31,0 lt / min
Q_a	147,6 lt / min
φ	2

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=520 (mm)

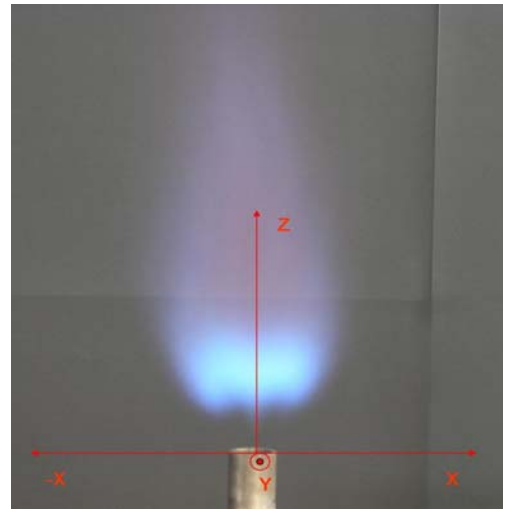
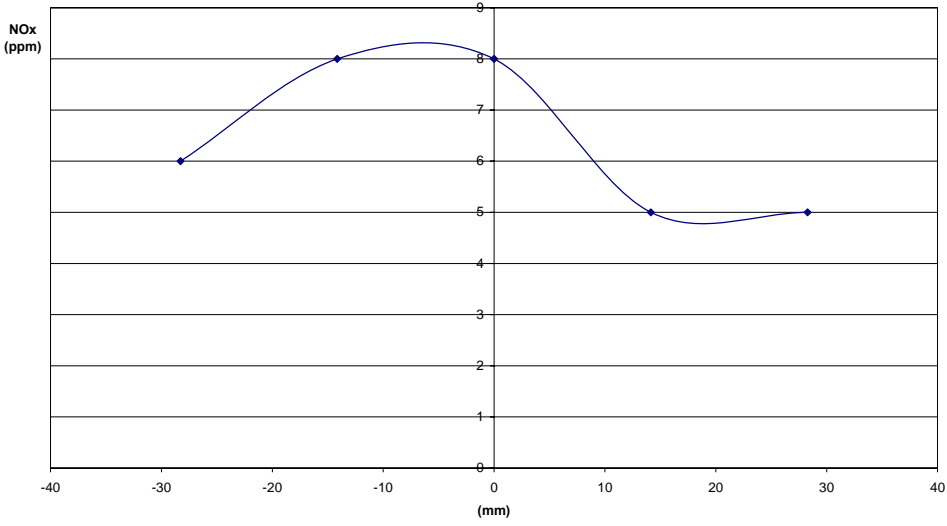


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=520 (mm)

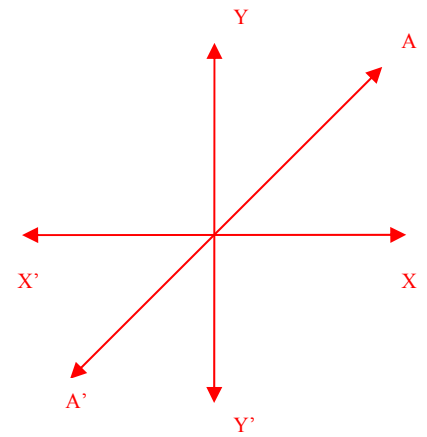
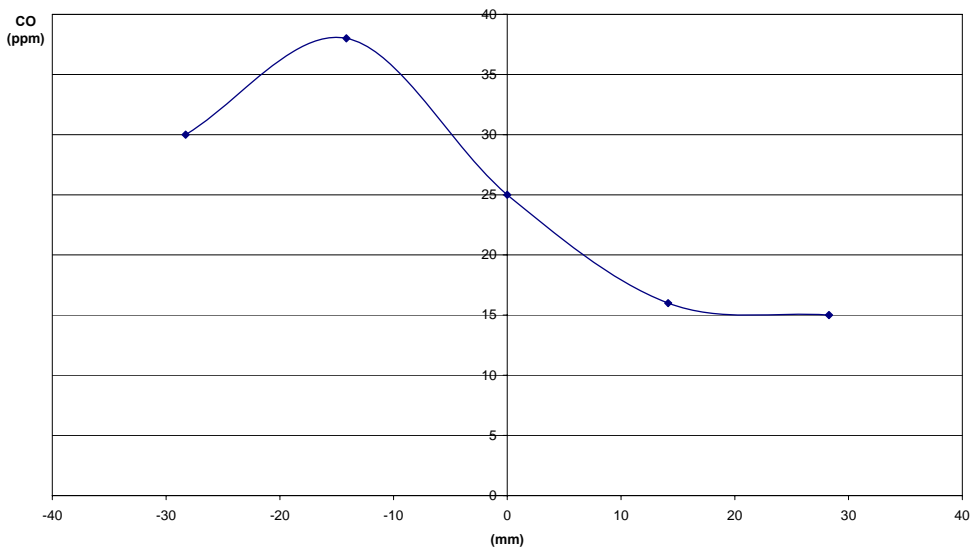


Σχήμα 4.27. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 030.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=570 (mm)



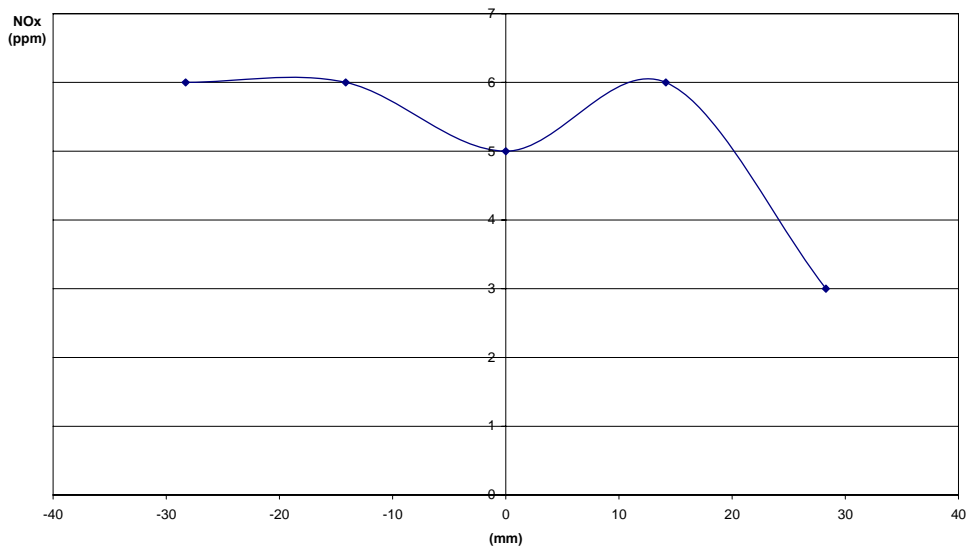
ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=570 (mm)



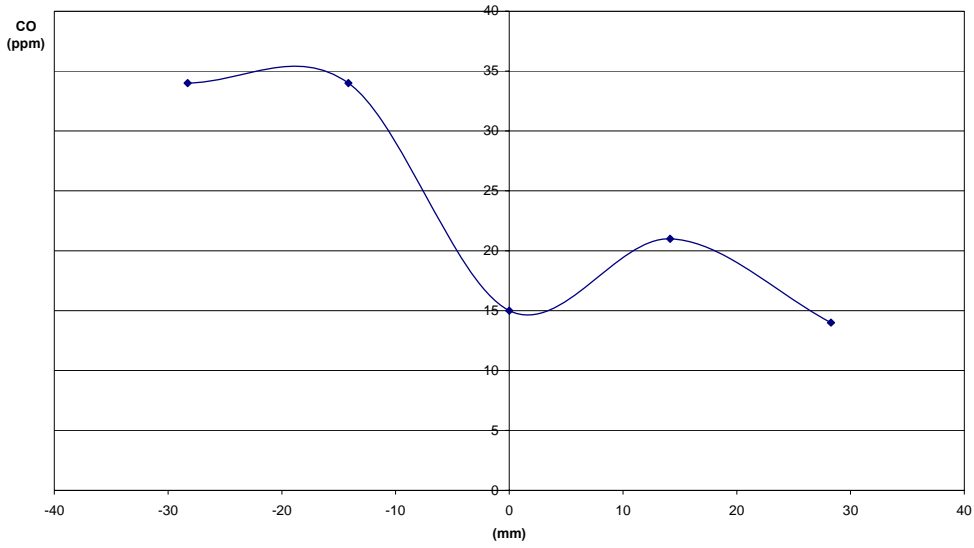
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ

Q_f	35,0 lt / min
Q_a	111,1 lt / min
φ	3

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=620 (mm)

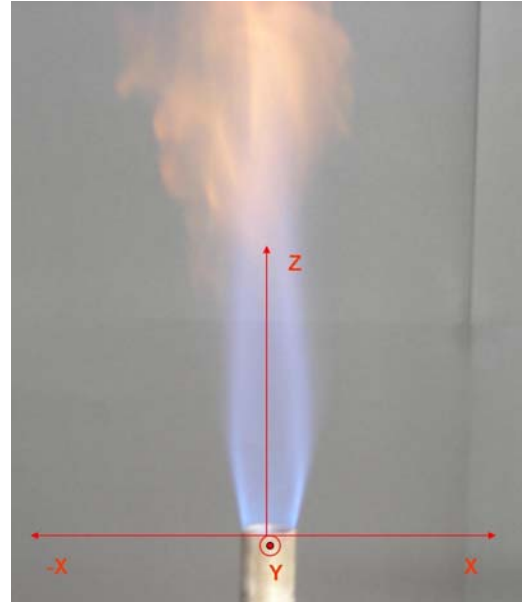
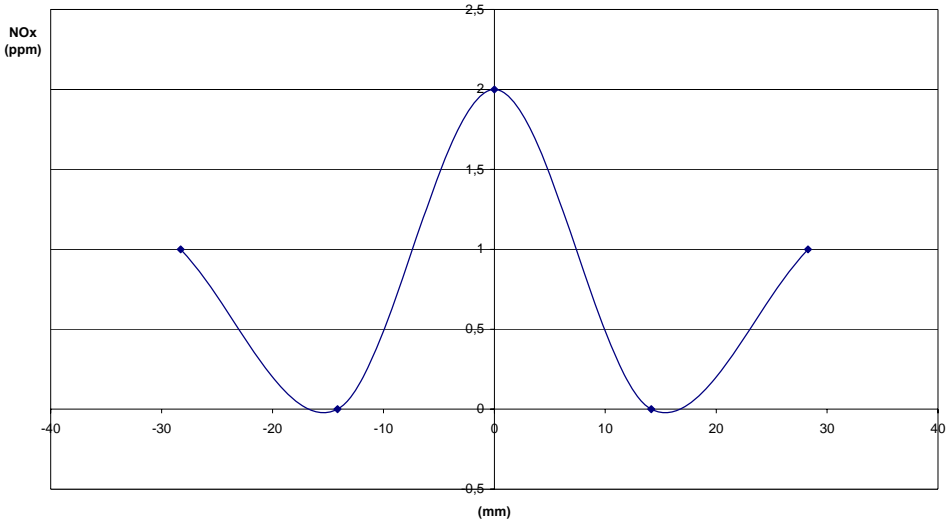


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=620 (mm)

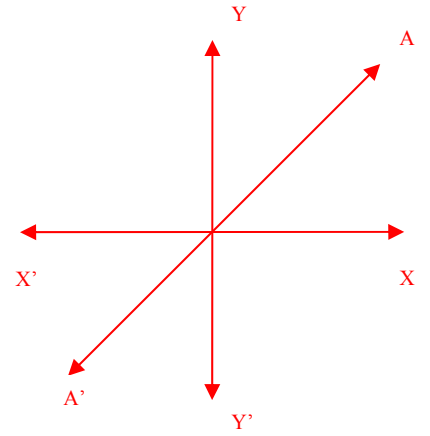
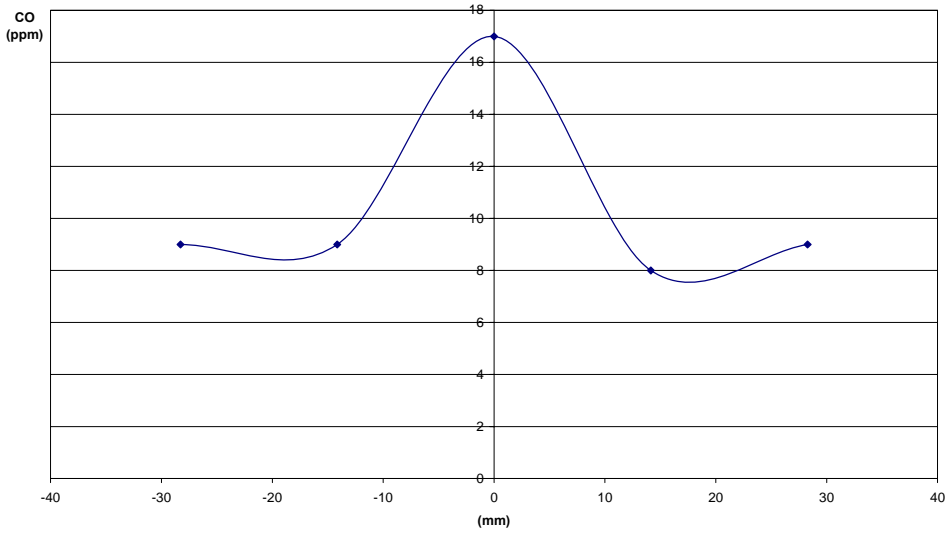


Σχήμα 4.28. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 048.

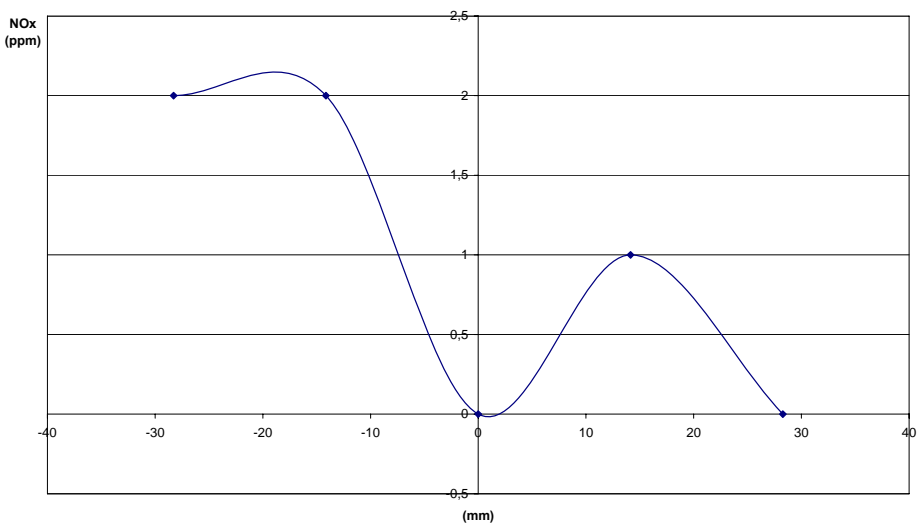
ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=200 (mm)



ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=200 (mm)

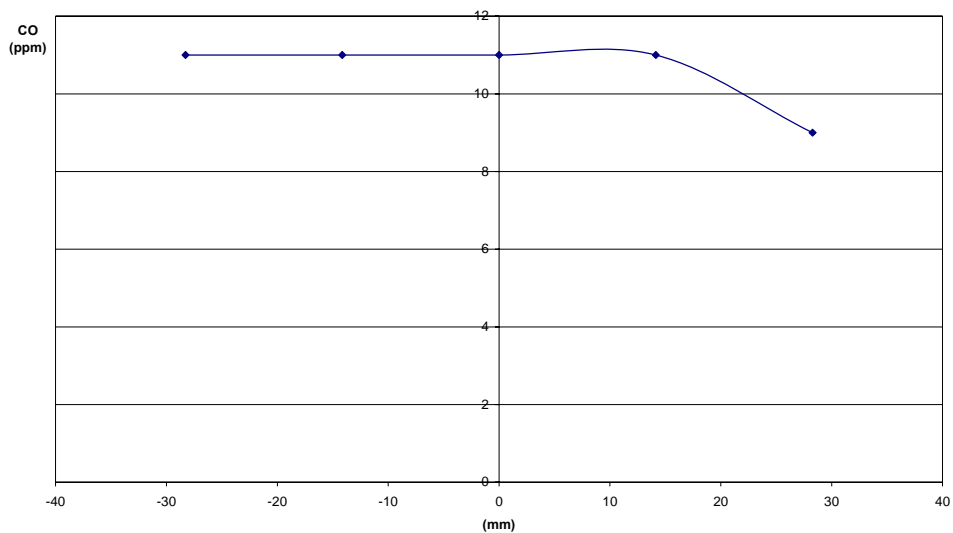


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=330 (mm)



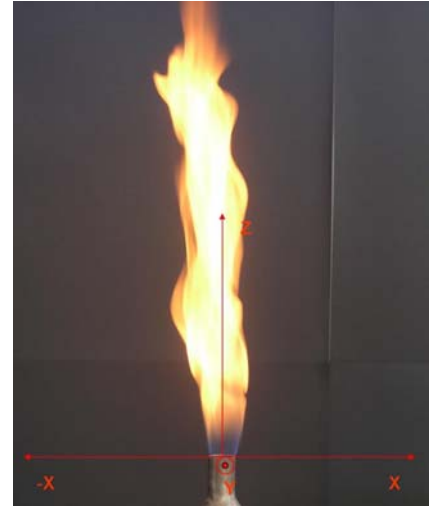
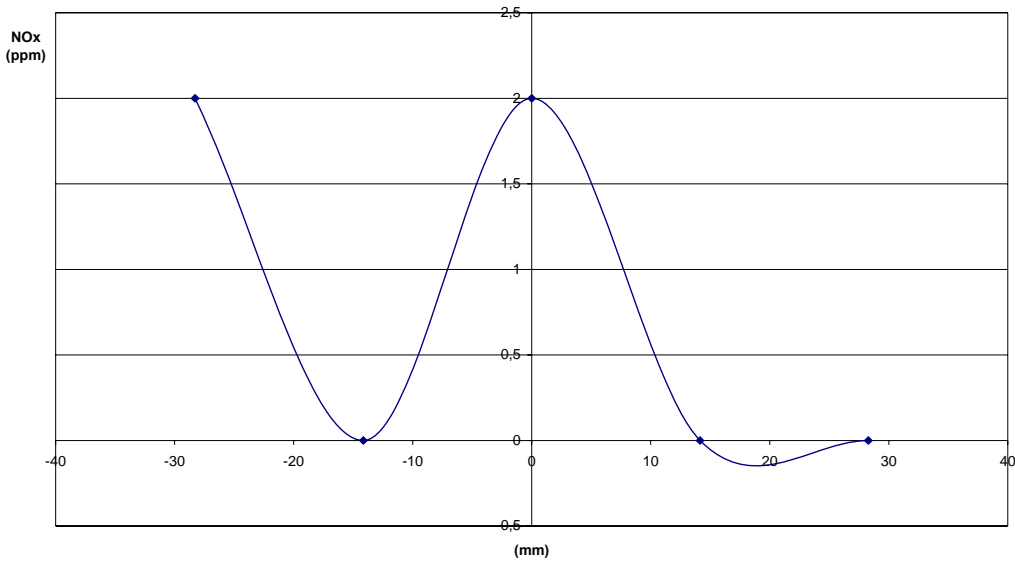
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	15,9 lt / min
φ	3

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=330 (mm)

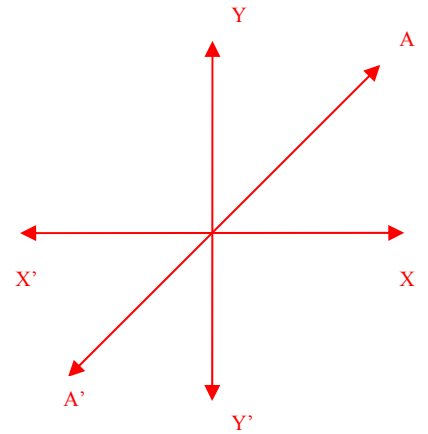
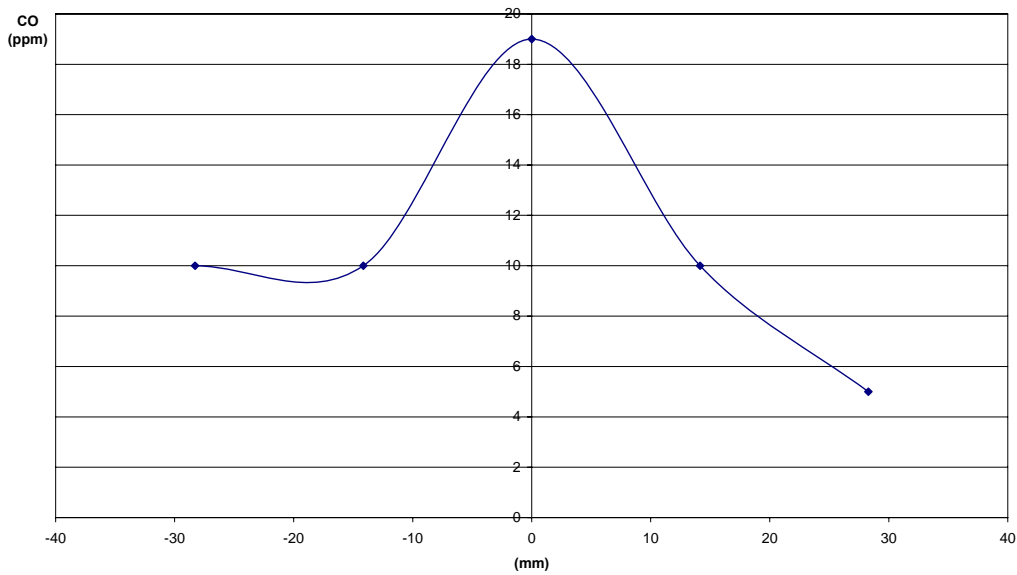


Σχήμα 4.29. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 033.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=470 (mm)

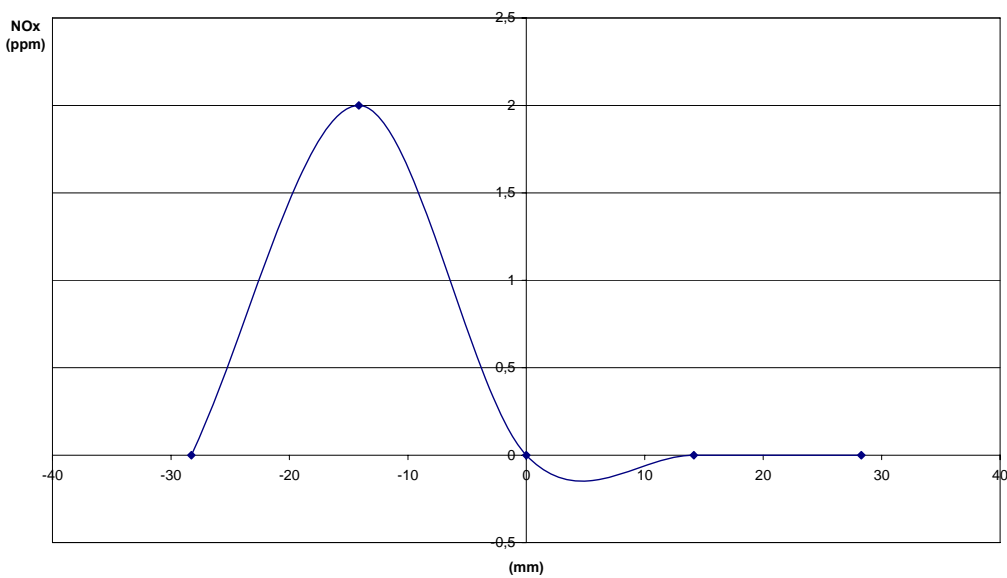


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=470 (mm)

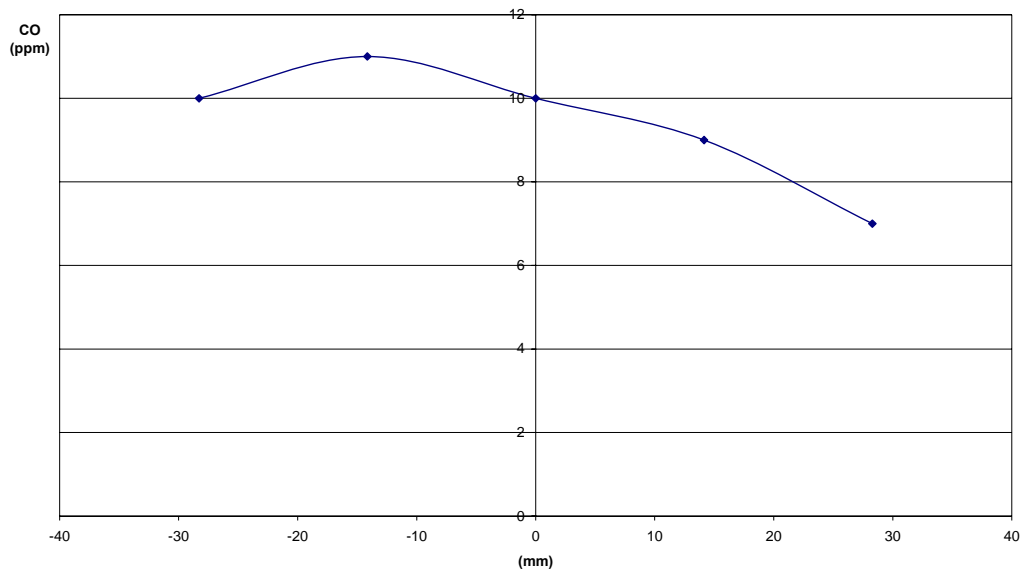


ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	5,0 lt / min
Q_a	4,8 lt / min
φ	10

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=510 (mm)

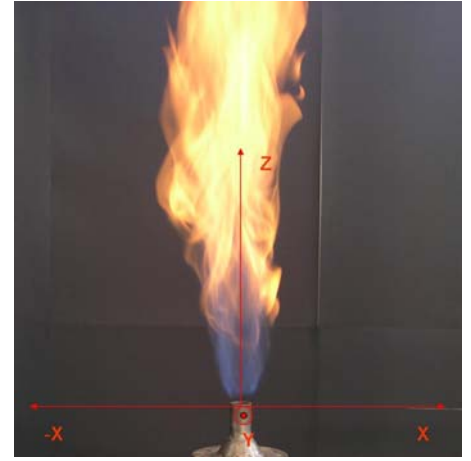
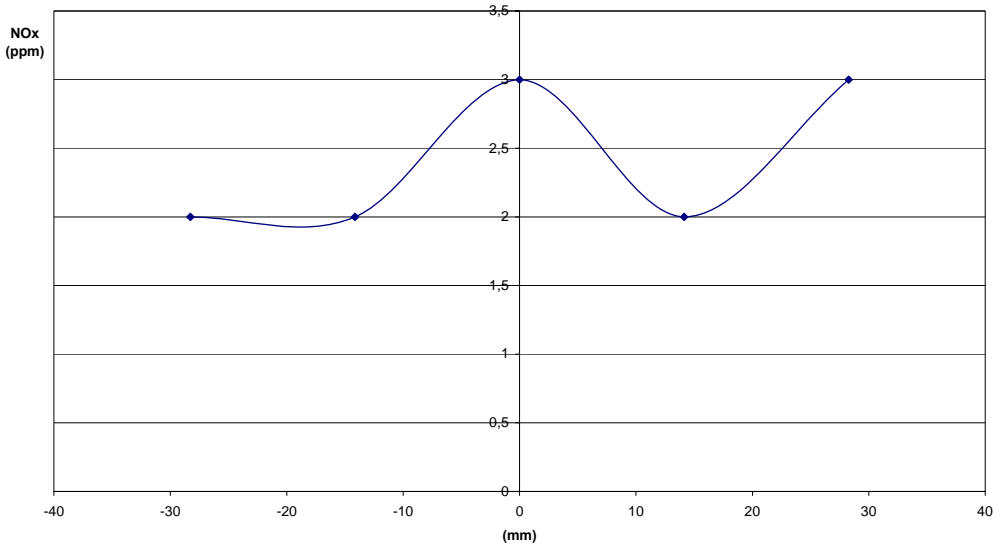


ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=510 (mm)

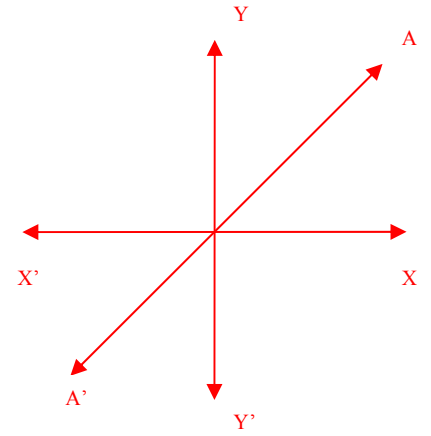
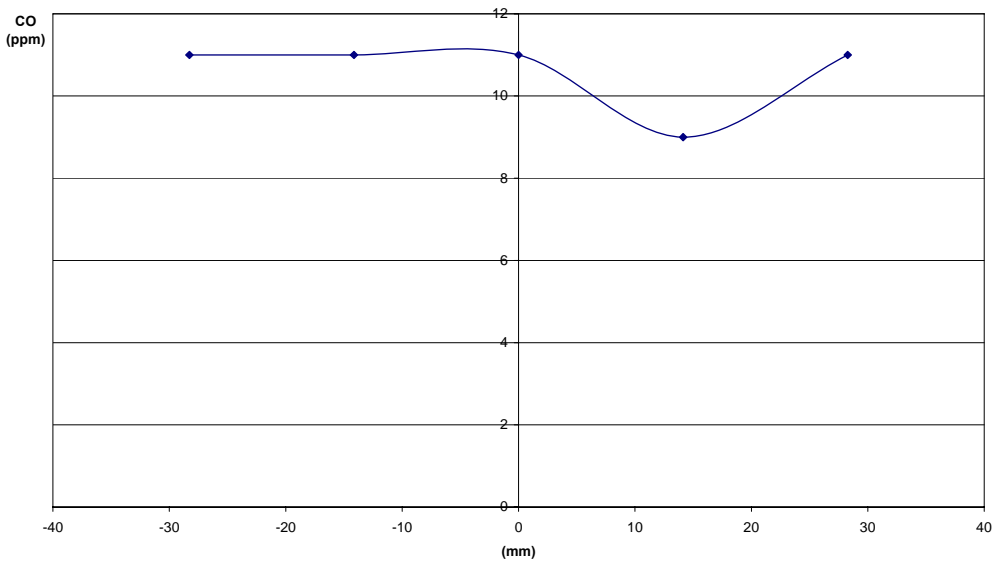


Σχήμα 4.30. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 145.

ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=970 (mm)



ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΕ ΥΨΟΣ Z=970 (mm)



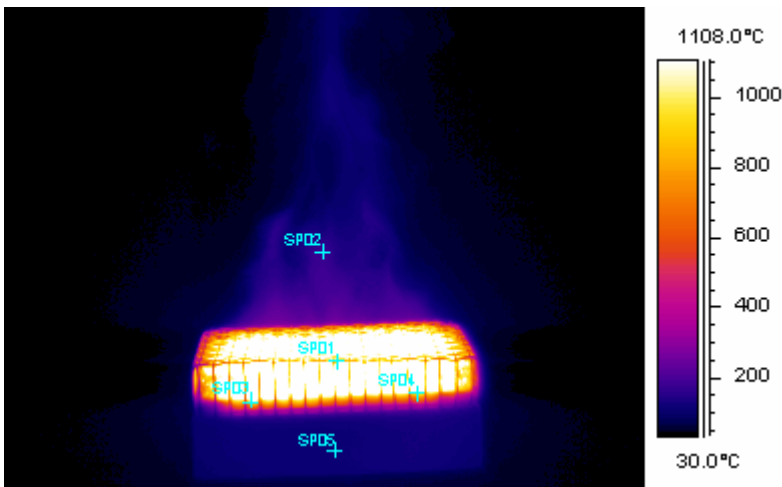
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΛΟΓΑΣ	
Q_f	35,0 lt / min
Q_a	33,3 lt / min
φ	10

Σχήμα 4.31. Γραφική παράσταση μεταβολής της θερμοκρασίας T ($^{\circ}C$) κατά μήκος του άξονα AA' , για τις συνθήκες της φωτογραφίας 160.

4.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΣΤΟΝ ΠΟΡΩΔΗ ΚΑΥΣΤΗΡΑ

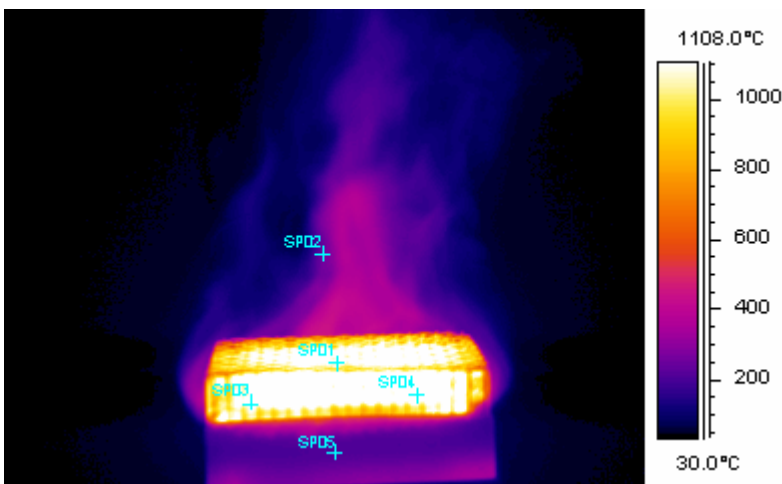
Πραγματοποιήθηκε τέλος προκαταρκτική μελέτη καταγραφής της κατανομής θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία του πορώδους καυστήρα με χρήση της θερμοκάμερας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για προαναμεμειγμένο μείγμα προπανίου-αέρα. Τα ληφθέντα θερμογραφήματα επεξεργάστηκαν στο πρόγραμμα ThermoCAM Researcher 2001 και παρουσιάζονται παρακάτω.

✓ Θερμογράφημα για : $Q_f = 13 \text{ Lt/min}$ και $Q_a = 370 \text{ Lt/min}$



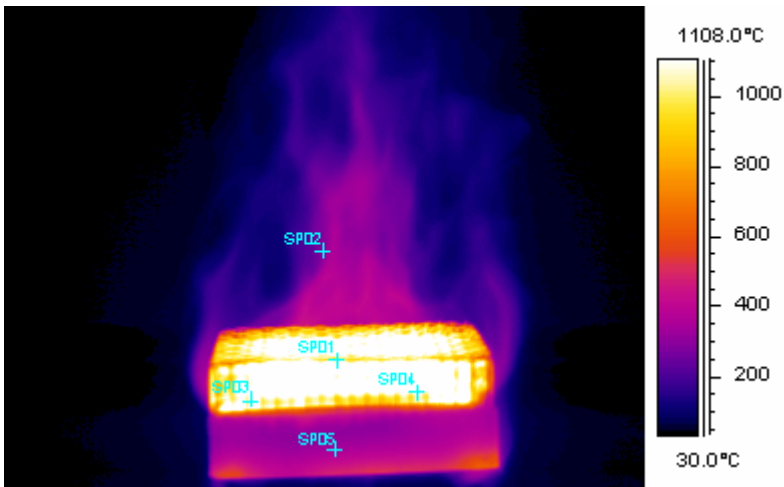
Spot 1	>1108.9 °C
Spot 2	170 °C
Spot 3	1094.8 °C
Spot 4	>1108.9 °C
Spot 5	111.3 °C

✓ Θερμογράφημα για : $Q_f = 13 \text{ Lt/min}$ και $Q_a = 190 \text{ Lt/min}$



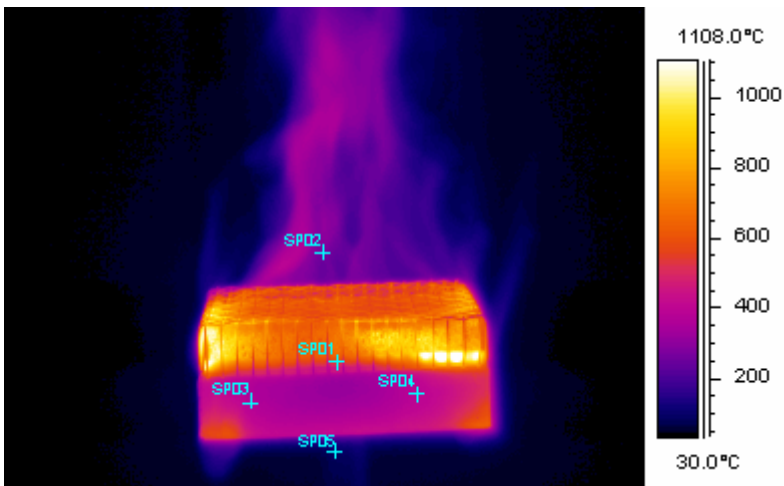
Spot 1	>1108.9 °C
Spot 2	256.5 °C
Spot 3	>1108.9 °C
Spot 4	>1108.9 °C
Spot 5	207.1 °C

✓ Θερμογράφημα για : $Q_f = 13 \text{ Lt/min}$ και $Q_a = 190 \text{ Lt/min}$



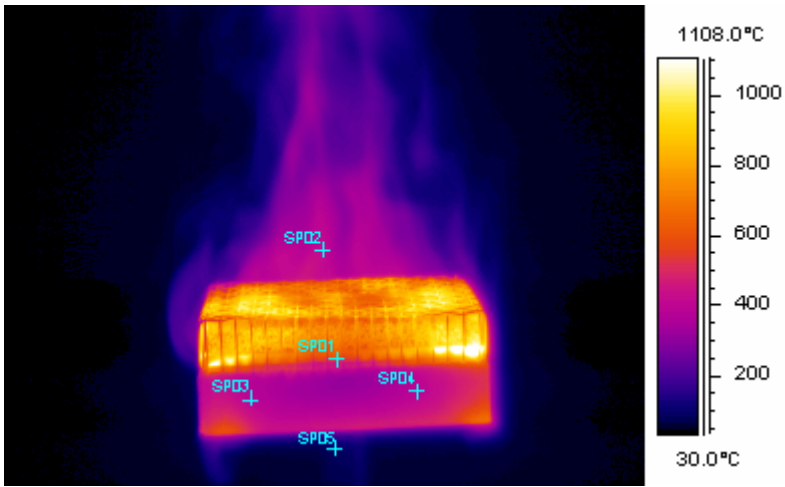
Spot 1	1005.4 °C
Spot 2	297.1 °C
Spot 3	>1108.9 °C
Spot 4	>1108.9 °C
Spot 5	348.7 °C

✓ Θερμογράφημα για : $Q_f = 13 \text{ Lt/min}$ και $Q_a = 80 \text{ Lt/min}$



Spot 1	569.4 °C
Spot 2	260.6 °C
Spot 3	369.5 °C
Spot 4	388.1 °C
Spot 5	89.3 °C

✓ Θερμογράφημα για : $Q_f = 13 \text{ Lt/min}$ και $Q_a = 80 \text{ Lt/min}$



Spot 1	565.7 °C
Spot 2	419.5 °C
Spot 3	393.1 °C
Spot 4	394.8 °C
Spot 5	91.2 °C

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μίας εργαστηριακής διάταξης για την μελέτη φαινομένων καύσης σε πρότυπους καυστήρες. Η διάταξη αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Ε.Μ.Π. και περιλαμβάνει ολοκληρωμένο σύστημα παροχής και ελέγχου ροής αερίων καυσίμων και αέρα, συστήματα απαγωγής καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας και συστήματα ασφαλείας. Η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της δομής της φλόγας σε δύο πρότυπους καυστήρες υπό ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Πραγματοποιήθηκαν επίσης εκτενείς μετρήσεις θερμοκρασίας, με χρήση θερμοστοιχείων και θερμοκάμερας, και χημικών ειδών, με χρήση αναλυτή καυσαερίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Μ. Φούντη, «Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005, σελ. 3,16-17,46-47, 256-270.
- [2]. Διπλωματική εργασία Ιωάννη Μανδηλαρά, «Εγκατάσταση πρότυπου αεριοποιητή ψυχρής φλόγας – ανάπτυξη και πιστοποίηση μετρητικών συστημάτων και σχετικού λογισμικού», Αθήνα 2004, σελ. 31,32,39,41-45,48,49.
- [3]. http://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_camera.