



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ ΓΙΑ ΤΑΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΤΩΝ
ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x) ΣΕ ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ**

ΜΑΡΙΟΣ ΙΩΑΝΝΟΥ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2007

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΡΟΓΔΑΚΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας Σχημάτων.....	3
Λίστα Πινάκων.....	4
Πίνακας Συμβόλων.....	5
Εισαγωγή	6
1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι και σχετική νομοθεσία.....	7
2. Τα οξειδία του αζώτου (NO _x).....	9
2.1. Εισαγωγή.....	9
2.2 Μηχανισμοί σχηματισμού οξειδίων του αζώτου (NO _x)	10
2.3. Αρχή λειτουργίας μεθόδου μέτρησης NO _x	11
3. Αναλυτές Οξειδίων του Αζώτου.....	14
3.1. Επιλογή αναλυτή για τις μετρήσεις NO _x	14
3.2 Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος.....	15
3.3 Ο αναλυτής fNO _x CLD400 της CAMBUSTION.....	16
4. Ανάλυση και σχεδιασμός δειγματολήπτη.....	18
4.1. Διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης του δειγματολήπτη.....	18
4.2. Θερμοδυναμική ανάλυση δειγματολήπτη.....	19
4.2.1 Υλικό κατασκευής.....	19
4.2.2 Διάμετρος δειγματολήπτη.....	20
4.2.3 Μήκος δειγματολήπτη.....	24
4.3 Κατασκευή δειγματολήπτη.....	30
5. Πειραματική διερεύνηση στην τράπεζα δοκιμών.....	33
5.1 Κατασκευή της τράπεζας δοκιμών και διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων.....	33
5.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων της τράπεζας δοκιμών.....	35
6. Πειράματα υπό κανονικές συνθήκες καύσης.....	46
Συμπεράσματα.....	57
Ευχαριστίες.....	59
Βιβλιογραφία.....	60
Παραρτήματα.....	62

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Αρχή λειτουργίας χημικής φωταύγειας (CLD).....	12
Σχήμα 3.2. Χρονικές παράμετροι μετρητικού συστήματος.....	15
Σχήμα 3.3. Το σύστημα της Cambustion CLD 400 fNOx με τον επεκτεινόμενο δειγματολήπτη.....	16
Σχήμα 4.1. Κατανομές ταχύτητας πλήρους αναπτυσσόμενης ροής σε αγωγό: α) στρωτή, β) τυρβώδης ροή.....	20
Σχήμα 4.2. Σχηματική απεικόνιση του χώρου με αέρια καύσης και των συνθηκών τους στην είσοδο του δειγματολήπτη.....	22
Σχήμα 4.3. Μεταφορά θερμότητας από τα αέρια στον δειγματολήπτη και στη συνέχεια στο περιβάλλον.....	25
Σχήμα 4.4. Εκτίμηση της πτώσης της θερμοκρασίας από την είσοδο μέχρι την έξοδο του δειγματολήπτη.....	29
Σχήμα 4.5. Σχηματική απεικόνιση του επεκτεινόμενου δειγματολήπτη.....	31
Σχήμα 5.1. Τράπεζα δοκιμών δειγματολήπτη.....	33
Σχήμα 5.2. Σύγκριση χρόνων απόκρισης των δειγματοληπτών Δ1 και Δ2.1.1.....	35
Σχήμα 5.2. Αποτελέσματα δοκιμών πρότυπου δειγματολήπτη Cambustion Δ1.....	39
Σχήμα 5.3. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.1.....	40
Σχήμα 5.4. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.2.....	40
Σχήμα 5.5. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.3.....	41
Σχήμα 5.6. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.4.....	41
Σχήμα 5.7. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.1.....	42
Σχήμα 5.8. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.2.....	43
Σχήμα 5.9. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.3.....	44
Σχήμα 5.10. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.4.....	45
Σχήμα 6.1α. Ο Δ1 στο σύστημα εξαγωγής, απέναντι από την βαλβίδα εξαγωγής του κυλίνδρου 1.....	47
Σχήμα 6.1β. Οι Δ2.Χ και Δ3.Χ στο σύστημα εξαγωγής, πίσω από την βαλβίδα του κυλίνδρου 1.....	47
Σχήμα 6.2α. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 100%.....	47
Σχήμα 6.2β. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 50%.....	48
Σχήμα 6.2γ. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 10%.....	49
Σχήμα 6.3α. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 100%.....	50

Σχήμα 6.3β. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 50%.....	51
Σχήμα 6.3γ. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 10%.....	52
Σχήμα 6.4α. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 100%.....	53
Σχήμα 6.4β. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 50%.....	54
Σχήμα 6.4γ. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 10%.....	54
Σχήμα 6.5α. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 100%.....	55
Σχήμα 6.5β. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 50%.....	56
Σχήμα 6.5γ. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 10%.....	56

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες των αναλυτών της Combustion, EcoPhysics και Horiba.....	14
Πίνακας 4.1. Ιδιότητες υλικών κατασκευής δειγματολήπτη.....	20
Πίνακας 4.2. Συνθήκες αερίων στο σημείο δειγματοληψίας.....	21
Πίνακας 4.3. Συνθήκες στο σημείο δειγματοληψίας και δεδομένα για την περίπτωση υπό εξέταση.....	28
Πίνακας 4.4. Βασικοί παράμετροι σχεδίασης δειγματολήπτη.....	32
Πίνακας 5.1. Κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ δειγματοληπτών.....	37

Πίνακας συμβόλων

CLD – Chemiluminescence Detector

PM – Particulate Matter

VOC –Volatile Organic Compounds,

IMO – International Maritime Organization

ΠΟΕ – Πτητικές Οργανικές Ουσίες

LCPD – Large Combustion Plant Directive

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe

LRTAP – Long Transboundary Air Pollution

ΘΧΦ – Θάλαμος χημικής φωταύγειας

PE – ρήξη των ελασμάτων

MEK – Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

ABE – Άνοιγμα βαλβίδας εξαγωγής

ΚΒΕ – Κλείσιμο βαλβίδας εξαγωγής

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ ΓΙΑ ΤΑΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x) ΣΕ ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΗΣ

Εισαγωγή

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και η αυξημένη ζήτηση ενέργειας έχουν ως επακόλουθο την αύξηση εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα και συνεπώς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Για τον έλεγχο και την μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν δημιουργηθεί και είναι πλέον σε ισχύ νομοθεσίες και κανονισμοί που οριοθετούν τις επιτρεπόμενες εκπεμπόμενες ποσότητες αερίων ρύπων.

Για αυτό τον λόγο διεξάγεται σημαντική έρευνα στο τομέα της ανάπτυξης τεχνολογιών και μεθόδων μείωσης εκπομπών ρύπων, σε όλους τους τομείς παραγωγής ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος είναι καθοριστικός ο ρόλος των μέσων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις ρύπων. Η αρχή λειτουργίας και η μέθοδος δειγματοληψίας των χρησιμοποιούμενων αναλυτών αερίων, επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης, και συνεπώς προδιαγράφονται από τις αντίστοιχες νομοθεσίες.

Η μελέτη που ακολουθεί αναφέρεται στην ανάλυση, εφαρμογή και βελτίωση κατασκευής ενός δειγματολήπτη (με ευρύ πεδίο εφαρμογών) για ταχεία δειγματοληψία των οξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα οξειδία του αζώτου είναι ένας από τους σημαντικότερους και πιο επιβλαβείς ρύπους και γι' αυτό οριοθετείται σχεδόν από όλες τις νομοθεσίες, σε κάθε τομέα παραγωγής ενέργειας. Η συνεχής μείωση των ορίων εκπομπών των NO_x με την εισαγωγή νέων νομοθεσιών, οδηγεί στην ανάγκη για μετρήσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια κάτι που επηρεάζεται από την ταχύτητα της δειγματοληψίας.

Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα ήδη υπάρχον σύστημα δειγματοληψίας, με αρχή λειτουργίας αναγνωρισμένη από τις σχετικές νομοθεσίες, το οποίο έχει τον χαμηλότερο χρόνο απόκρισης στην αγορά, στην κατηγορία του. Το σύστημα αυτό έχει ένα πολύ συγκεκριμένο (μικρό) εύρος εφαρμογής και γι' αυτό επιτυγχάνει πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης και ακρίβεια στη μέτρηση και συνδυασμό με ένα δειγματολήπτη (probe) μικρού μήκους.

Για να αυξηθεί το εύρος εφαρμογών του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα να διατηρηθεί η ταχύτητα και ακρίβεια της μέτρησης, χρειάστηκε να αυξηθεί το μήκος του δειγματολήπτη του συστήματος ώστε να προσφέρει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε αγωγούς καυσαερίων μηχανημάτων μεγάλου μεγέθους χωρίς να παρουσιάζεται πρόβλημα πρόσβασης σε σημαντικά σημεία δειγματοληψίας τα οποία είναι δύσκολα επισκέψιμα. Η μελέτη που ακολουθεί αφορά στην ανάλυση, και στη συνέχεια, πειραματική διερεύνηση για την ανάπτυξη ενός δειγματολήπτη NO_x με πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης.

1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι και σχετική νομοθεσία

Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τοξικών αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων που εκπέμπονται στην τροπόσφαιρα του πλανήτη (ύψος: 0-15 km), καθώς και ποικιλία φωτοχημικών δευτερογενών ρύπων και άλλων ατμοσφαιρικών φαινομένων που είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενών εκπομπών.

Οι κυριότερες πηγές ρύπανσης της ατμόσφαιρας είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και βιοτεχνίες (κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας και σκόνης από την κατεργασία υλικών), οι κεντρικές θερμάνσεις των οικιών, η καύση απορριμμάτων και γεωργικών υπολειμμάτων, οι αέριες εκπομπές από τη γεωργία και τη κτηνοτροφία και οι φυσιολογικές εκπομπές φυτών και δένδρων.

Οι κυριότεροι ρύποι είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα (CO , CO_2), το διοξείδιο του θείου (SO_2), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs, volatile organic compounds), και ποικιλία αιωρούμενων σωματιδίων (suspended particulate matter), από καυσαέρια, βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οικοδομικές εργασίες και ηφαιστειογενή δραστηριότητα [1].

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) δεν είναι τοξικό αέριο αλλά με την υπερβολική συγκέντρωση του στην ατμόσφαιρα συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αντιθέτως, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι εξαιρετικά τοξικό αέριο που παράγεται κατά 70-80% από μηχανές εσωτερικής καύσης. Το διοξείδιο του θείου (SO_2) είναι επίσης αρκετά τοξικός αέριος ρύπος και είναι αποτέλεσμα της χρήσης ορυκτών καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Με τη βελτίωση των καυσίμων (αποθείωση) οι εκπομπές SO_2 έχουν μειωθεί σημαντικά. Τα οξειδία του αζώτου (NO , NO_2 , NO_x) είναι αέριοι ρύποι των καυσαερίων των κινητήρων (40-50%), παράγονται όμως και κατά 50% από διάφορες διεργασίες καύσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα NO_x είναι ένας ακόμη παράγοντας για την παραγωγή όξινης βροχής, ενώ συμβάλλουν μαζί με το CO_2 και το μεθάνιο (CH_4) στην έξαρση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ειδικά τα NO_x αποτελούν αντικείμενο διαβούλευσης για δημιουργία διεθνούς συνθήκης για τον περιορισμό τους [2]. Τα αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter) είναι ένα σύνολο μικρής διαμέτρου σωματιδίων (από 50 μέχρι 0,1 μm) από διάφορα υλικά και διεργασίες καύσης που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα αστικών και βιομηχανικών περιοχών. Τα σωματίδια αυτά προκαλούν ασθένειες και κακοήθεις νεοπλασίες του αναπνευστικού συστήματος.

Πτητικές οργανικές ουσίες (ΠΟΕ, Volatile Organic Compounds) χαρακτηρίζονται κυρίως οι πτητικές αρωματικές ενώσεις (όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, ξυλόλια κλπ) που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Οι πηγές των VOCs είναι οι βιομηχανίες, τα καυσαέρια των οχημάτων, τα πρατήρια υγρών καυσίμων, χρώματα και οικοδομικά υλικά. Οι ΠΟΕ παίζουν σημαντικό ρόλο σε φωτοχημικές αντιδράσεις και συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω της υψηλής τοξικής και καρκινογόνου δράσης. Το όζον (O_3) είναι δευτερογενής ατμοσφαιρικός ρύπος, που παράγεται ως αποτέλεσμα των φωτοχημικών αντιδράσεων μεταξύ υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα. Λόγω της οξειδωτικής ικανότητας του θεωρείται εξαιρετικά επικίνδυνος ρύπος, τόσο για την υγεία του ανθρώπου, όσο και για βλάβες στα φυτά, τα δένδρα και τα υλικά.

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και η αυξημένη ζήτηση ενέργειας έχουν ως επακόλουθο την αύξηση των εκπομπών ρύπων και συνεπώς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ατμόσφαιρα. Για τον έλεγχο και για την μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων έχουν δημιουργηθεί και είναι πλέον σε ισχύ νομοθεσίες και κανονισμοί που οριοθετούν τις επιτρεπόμενες ποσότητες αερίων ρύπων από τις διάφορες πηγές τους. Οι σημαντικότερες από αυτές τις νομοθεσίες είναι οι εξής:

(α) UNECE / LRTAP (United Nations Economic Commission for Europe / Long Transboundary Air Pollution). Αφορά στις εθνικές επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων και συνεπώς την ρύπανση μέσω διασυνοριακής μεταφοράς,

(β) LCPD (Large Combustion Plant Directive). Νομοθετεί τις εκπομπές ρύπων από μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας και βιομηχανίες,

(γ) Ευρωπαϊκή νομοθεσία "EURO IV". Αφορά στα επιτρεπτά όρια ρύπων από μηχανές εσωτερικής καύσης επιβατικών οχημάτων και

(δ) IMO/MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Αφορά στις εκπομπές ρύπων από ναυτικούς κινητήρες.

Εκτός από τις νομοθεσίες έχουν υπογραφεί και διεθνείς συμβάσεις για τον περιορισμό της ρύπανσης. Μια από αυτές είναι το Πρωτόκολλο του Kyoto (1997) που επισημοποιήθηκε το 2005 και που πρωταρχικό ρόλο έχει τον περιορισμό των εκπομπών CO_2 , CH_4 και NO_x .

2. Τα οξειδία του αζώτου (NO_x)

2.1. Εισαγωγή

Διατάξεις για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) υπάρχουν σχεδόν σε όλες τις νομοθεσίες και κανονισμούς που έχουν προαναφερθεί και τα επιτρεπόμενα όρια τους συνεχώς μειώνονται με τις νέες νομοθεσίες. Τα NO_x προέρχονται κυρίως από τα καυσάεργα κινητήρων (ντίζελ και βενζίνης) και από καυστήρες (Boilers) που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Σε διεθνή κλίμακα, υπολογίζεται ότι 85-99x10⁶ τόνοι αζώτου εναποτίθενται στην ατμόσφαιρα, εκ των οποίων το 1/3 προέρχεται από φυσικές διεργασίες [3] και τα υπόλοιπα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Η σημαντική αυτή ποσότητα δικαιολογεί την ανησυχία των αρχών για τις εκπομπές NO_x και συνεπώς την δημιουργία των νομοθεσιών. Οι νομοθεσίες υποχρεώνουν τους κατασκευαστές (μηχανών εσωτερικής καύσης, καυστήρων κ.α.) να παράγουν μηχανήματα τα οποία εκπέμπουν ρύπους μέσα στα επιτρεπόμενα όρια. Η νομοθεσία αναγκάζει επίσης και τους τελικούς χρήστες (πχ αυτοκινητοβιομηχανίες, ναυτιλιακές εταιρείες, σταθμούς παραγωγής ενέργειας κ.α) να ελέγχουν συνεχώς τις εκπομπές από τα μηχανήματα / εργοστάσια / σταθμούς και να κάνουν τις ανάλογες μετατροπές ή ρυθμίσεις ώστε αυτά να ικανοποιούν τις αντίστοιχες νομοθεσίες.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει έμμεσα το κόστος ανάπτυξης μιας τεχνολογίας ή τον έλεγχο και μετατροπή μιας ήδη υπάρχουσας είναι η ακρίβεια της μέτρησης.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης ρύπων είναι:

- (α) η αρχή λειτουργίας της μεθόδου,
- (β) ο χρόνος απόκρισης του συστήματος και
- (γ) το σημείο δειγματοληψίας.

Και οι τρεις αυτοί παράγοντες είναι προκαθορισμένοι στις διάφορες νομοθεσίες (IMO, EURO, κ.α.) που αφορούν σε μετρήσεις ρύπων.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να μελετηθεί και να τροποποιηθεί ένα ήδη υπάρχον σύστημα δειγματοληψίας NO_x, ώστε να αυξηθεί το εύρος των εφαρμογών του, αλλά ταυτόχρονα να διατηρηθεί η απόδοση του και να συνεχίζει να πληρεί τους κανονισμούς και απαιτήσεις των αντιστοίχων νομοθεσιών.

Για παράδειγμα, ένα σύστημα που έχει σχεδιαστεί με αποκλειστική εφαρμογή τους κινητήρες επιβατικών οχημάτων, θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πολύ μεγαλύτερες

εφαρμογές, όπως σε ναυτικούς κινητήρες, καυστήρες σταθμών παραγωγής ενέργειας ή ακόμα και στις καμινάδες των σταθμών (stacks). Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός χρειάζεται μια μηχανολογική μελέτη του συστήματος μέτρησης NOx, η οποία θα αποτελείται από θερμοδυναμική ανάλυση και πειραματική διερεύνηση.

2.2 Μηχανισμοί σχηματισμού οξειδίων του αζώτου (NOx)

Τα οξειδία του αζώτου σχηματίζονται κατά την διαδικασία της καύσης στο μέτωπο της φλόγας και τις γύρω περιοχές ψηλών θερμοκρασιών, με οξειδωση των μορίων του αζώτου του αέρα καύσης και του καυσίμου.

Διακρίνονται τρεις βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού των NOx [4]:

- Θερμικό NOx που σχηματίζεται από το μοριακό άζωτο που περιέχει ο αέρας καύσης και οξυγόνο σε θερμοκρασίες άνω των 1300°C. Ο σχηματισμός εξαρτάται από την θερμοκρασία, τον χρόνο παραμονής στη ζώνη ψηλών θερμοκρασιών και την μερική πίεση του οξυγόνου.

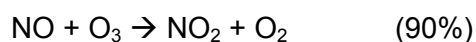
- Άμεσο NOx που σχηματίζεται από την αντίδραση υδρογονανθράκων, σε περιοχές φλόγας με λίγο οξυγόνο, και μοριακού αζώτου. Ο σχηματισμός είναι συνάρτηση της στοιχειομετρικής σχέσης και της θερμοκρασίας. Το ποσοστό του NOx που σχηματίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο, σε σχέση με το συνολικό NOx, είναι μικρό.

- NOx του καυσίμου, σχηματίζεται από την οξειδωση του σε οργανικές ενώσεις που περιέχουν αζώτου. Ο σχηματισμός του NOx, εξαρτάται μερικώς από την θερμοκρασία και λαμβάνει χώρα σε περιοχές θερμοκρασιών σημαντικά μικρότερες από ότι σχηματίζεται το θερμικό NOx. Είναι άμεσα εξαρτώμενο από την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο, αυξάνει δηλαδή με το λόγο αέρα και επηρεάζεται σημαντικά από την διαδικασία ανάμειξης του καυσίμου με τον αέρα.

Οι μηχανισμοί σχηματισμού των NOx, δείχνουν την άμεση επίδραση που έχει η εστία καύσης.

2.3. Αρχή λειτουργίας μεθόδου μέτρησης NOx

Η πιο αξιόπιστη και ευρέως διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης των NOx είναι η μέθοδος της χημικής φωταύγειας η οποία είναι αποδεκτή από όλες προαναφερθείσες νομοθεσίες. Η αρχή λειτουργίας της χημικής φωταύγειας (σχήμα 2.1) βασίζεται στη φωτοχημική αντίδραση μεταξύ όζοντος (O₃) και του οξειδίου του αζώτου (NO) κατά την οποία παράγεται διοξείδιο αζώτου (NO₂) και οξυγόνο. Περίπου 10% του παραγόμενου NO₂ βρίσκεται σε μια κατάσταση διέγερσης (NO₂^{*}) και η μετάβαση από την κατάσταση αυτή στην κανονική (καθώς τα μόρια χάνουν ενέργεια) συνοδεύεται από εκπομπή φωτός με μήκος κύματος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 600 – 3000nm.



Η ένταση αυτής της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της παροχής μάζας του NO₂ μέσα στο θάλαμο αντίδρασης και η εκπομπή του φωτός ανιχνεύεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται και διοχετεύεται στο μετρητή. Μόνο ένα μικρό ποσοστό από τα διεγερμένα μόρια του NO₂ χάνουν ενέργεια εκπέμποντας φως. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας χάνεται από συγκρούσεις με άλλα μόρια. Επειδή ο αριθμός των συγκρούσεων ανά δευτερόλεπτο μεταβάλλεται ευθέως ανάλογα με τη πίεση, είναι προφανές ότι η διατήρηση υψηλής πίεσης ευνοεί την απώλεια ενέργειας με τη μορφή συγκρούσεων. Γι' αυτό το λόγο το σύστημα λειτουργεί σε χαμηλή πίεση έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εκπομπή φωτός από τη φωτοχημική αντίδραση. Επίσης, η λειτουργία σε συνθήκες χαμηλής πίεσης ελαχιστοποιεί την επίδραση άλλων αερίων τα οποία ευνοούνται από την απενεργοποίηση του NO₂ προκαλώντας συγκρούσεις μεταξύ των μορίων, μειώνοντας έτσι την ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός.

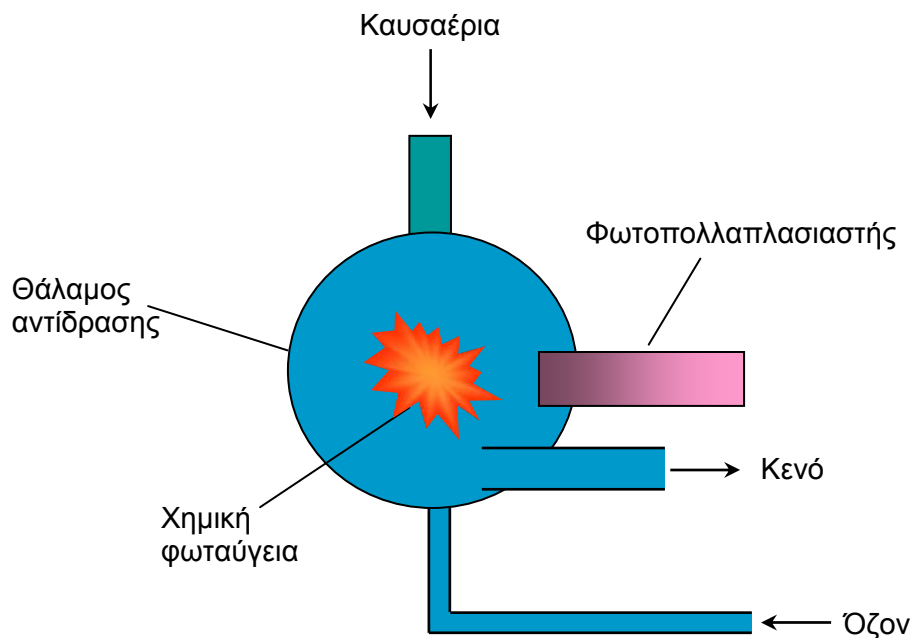
Μια μετρητική συσκευή οξειδίων του αζώτου με τη μέθοδο χημικής φωταύγειας αποτελείται, εν γένει, από τα εξής τμήματα:

- Τη μονάδα ανιχνευτή / αντιδραστήρα
- Τη μονάδα παραγωγής όζοντος

- Μονάδα μετατροπής NO₂ σε NO
- Τη μονάδα καταστροφής περίσσειας όζοντος
- Το φωτοπολλαπλασιαστή και το λοιπό ηλεκτρικό κύκλωμα.

Το όζον παράγεται από καθαρό αέρα όπου ένα μέρος του οξυγόνου, υπό την επίδραση μιας υψηλής ενέργειας φωτεινής πηγής, μετατρέπεται σε όζον χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει ότι κατά τη διάρκεια της παραγωγής του όζοντος δεν παράγεται ταυτόχρονα και οξειδίο του αζώτου από το υπάρχον στον αέρα άζωτο.

Η τεχνική της χημικής φωταύγειας μπορεί να ανιχνεύσει μόνο οξειδία αζώτου (NO) και για αυτό η συσκευή διαθέτει μια μονάδα μετατροπής (converter) του NO₂, που περιέχεται στα καυσαέρια, σε NO. Η μετατροπή γίνεται περνώντας το δείγμα μέσα από ένα θερμαινόμενο σωλήνα από τιτάνιο ο οποίος περιέχει ένα ανθρακούχο υλικό σε θερμοκρασία 400°C.

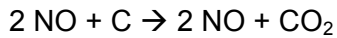
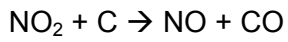


Σχήμα 2.1. Αρχή λειτουργίας χημικής φωταύγειας (CLD)

Ένα μέρος μετατρέπεται θερμικά:



Το υπόλοιπο μετατρέπεται χημικά από ανθρακούχο υλικό:



Όταν το υπό εξέταση δείγμα περάσει μέσα από τον μετατροπέα, τότε η ένδειξη αναφέρεται σε NO_x καθώς τα μετρούμενα οξειδία αζώτου περιέχουν και το διοξείδιο του αζώτου που έχει ήδη μετατραπεί σε μονοξείδιο του αζώτου. Όταν το δείγμα παρακάμπτει το μετατροπέα τότε η ένδειξη αναφέρεται σε NO. Η συγκέντρωση του NO₂ βρίσκεται τότε με απλή αφαίρεση του NO από την ένδειξη NO_x.

Για τη βαθμονόμηση της συσκευής χρησιμοποιούνται φιάλες πρότυπων αερίων N₂ και NO.

3. Αναλυτές Οξειδίων του Αζώτου

3.1. Επιλογή αναλυτή για τις μετρήσεις NOx

Για τις μετρήσεις των NOx η μέθοδος της χημικής φωταύγειας είναι αποδεκτή από όλες τις σχετικές νομοθεσίες και όντας η πιο αναγνωρισμένη χρησιμοποιείται από τους πιο γνωστούς κατασκευαστές αναλυτών όπως είναι οι εταιρίες Cambustion, Ecophysics και Horiba. Μετά από έρευνα αγοράς τα σημαντικότερα στοιχεία του κάθε αναλυτή που λήφθηκαν υπόψη για την καταλληλότητα του στη συγκεκριμένη εφαρμογή αντιπαραβάλλονται στο πίνακα 3.1. Λεπτομερής τεχνική περιγραφή του κάθε αναλυτή δίνεται στο παράρτημα 1.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	Cambustion	Ecophysics	Horiba
Τύπος Αναλυτή	CLD 400	REht700	MEXA 1400 FRI
Χρόνος απόκρισης	10 ms	1 s	27 ms
Μετατροπές NO ₂	Προαιρετικός	Ενσωματωμένος	-
Επαναληψιμότητα	-	0,05ppm	±1% της κλίμακας
Γραμμικότητα	±1% της κλίμακας	±1% της κλίμακας	±1% της κλίμακας
Απόκλιση του "μηδέν"	-	-	±1% της κλίμακας/ώρα

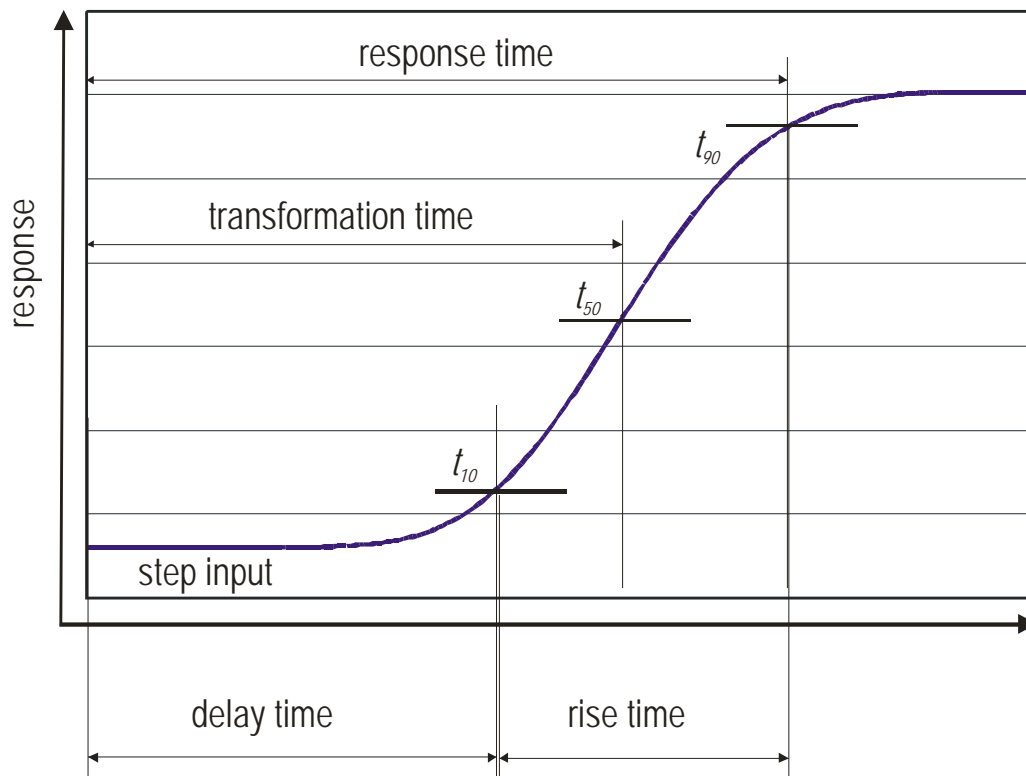
Πίνακας 3.1. Κατασκευαστικές λεπτομέρειες των αναλυτών της Cambustion, Ecophysics και Horiba

Ο χρόνος απόκρισης του συστήματος εξαρτάται άμεσα από την απόσταση του σημείου δειγματοληψίας και του θαλάμου χημικής φωταύγειας (ΘΧΦ). Όσο πιο μικρή η απόσταση αυτή τόσο πιο μικρός ο χρόνος απόκρισης. Ο δειγματολήπτης ενός τυπικού συστήματος CLD έχει μήκος 100mm και στο ένα άκρο του είναι ενσωματωμένος ο θάλαμος χημικής φωταύγειας. Το μικρό αυτό μήκος σε συνδυασμό με άλλους παράγοντες (π.χ. τη διάμετρο και το υλικό) καθορίζουν τον πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης του συγκεκριμένου συστήματος. Το μειονέκτημα όμως ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι, για οικονομικούς παράγοντες έχει συγκεκριμένη εφαρμογή, π.χ. αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης επιβατικών οχημάτων. Το μήκος των 100mm επιτρέπει την τοποθέτηση του δειγματολήπτη στο σχετικά μικρού μεγέθους σύστημα

εξαγωγής ώστε το σημείο δειγματοληψίας να είναι κοντά στη βαλβίδα εξαγωγής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται με μεγάλη ακρίβεια η μέτρηση των οξειδίων του αζώτου. Για να επιτευχθούν μετρήσεις NOx παρόμοιας ακρίβειας σε μεγαλύτερες εφαρμογές (πχ ναυτικούς κινητήρες, καυστήρες σταθμών παραγωγής ενέργειας κ.α.) είναι βασική προϋπόθεση ο δειγματολήπτης να έχει το κατάλληλο μήκος ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στην έξοδο του θαλάμου καύσης.

3.2 Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος

Η απόδοση ενός μετρητικού συστήματος χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους που φαίνονται στο σχήμα 3.1. Για κάθε μετρητικό σύστημα οι παράμετροι αυτοί αναφέρονται από τον κατασκευαστή στις προδιαγραφές του συγκεκριμένου συστήματος.



Σχήμα 3.1. Χρονικές παράμετροι του μετρητικού συστήματος

Το σχήμα 3.1 απεικονίζει τις βασικές χρονικές παραμέτρους του μετρητικού συστήματος οι οποίες είναι:

- ο χρόνος καθυστέρησης (Delay Time - T_{10}),
- ο χρόνος μετατροπής (Transformation time - T_{50}) και
- ο χρόνος απόκρισης (Rise Time - T_{10-90}).

Ο χρόνος απόκρισης είναι ο σημαντικότερος και καθορίζεται από την κλίση της καμπύλης. Όσο πιο απότομη η κλίση τόσο πιο μικρός ο χρόνος απόκρισης. Στην ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές που περιγράφεται σε επόμενες παραγράφους χρειάστηκε να υπολογιστούν μόνο οι χρόνοι T_{10} και T_{10-90} .

3.3 Ο αναλυτής fNOx CLD400 της CAMBUSTION

Για τις μετρήσεις των NOx χρησιμοποιήθηκε το σύστημα της Cambustion με βάση τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2. Το σύστημα της Cambustion CLD 400 fNOx με τον επεκτεινόμενο δειγματολήπτη

Το σύστημα αυτό έχει τον μικρότερο χρόνο απόκρισης απ' όλα τα υπόλοιπα συστήματα της κατηγορίας του και η τιμή όλων είναι στα ίδια περίπου επίπεδα.

Ο πολύ μικρός χρόνος απόκρισης εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση και παρέχει επίσης τη δυνατότητα στον ερευνητή να παρατηρήσει τυχόν φαινόμενα στη συμπεριφορά των NO_x τα οποία συμβαίνουν αρκετά γρήγορα. Το σύστημα της Combustion φαίνεται στο σχήμα 3.2.

4. Ανάλυση και σχεδιασμός δειγματολήπτη

4.1. Διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης του δειγματολήπτη

Όπως προαναφέρθηκε, για να επιτευχθούν μετρήσεις NOx μεγάλης ακρίβειας, βασική προϋπόθεση είναι ο δειγματολήπτης να έχει το κατάλληλο μήκος ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Για μεγάλες εφαρμογές (πχ ναυτικούς κινητήρες, καυστήρες σταθμών παραγωγής ενέργειας κ.α.) αυτό προϋποθέτει ο δειγματολήπτης να έχει το ανάλογο μήκος. Στη διαδικασία που ακολουθεί ο δειγματολήπτης ενός υπάρχοντος μετρητικού συστήματος τροποποιήθηκε και αυξήθηκε το μήκος του χωρίς όμως αυτό να επηρεάσει την ταχύτητα και ακρίβεια της δειγματοληψίας. Με αυτή την αλλαγή αυξήθηκε το εύρος εφαρμογών του δειγματολήπτη.

Για την κατασκευή του νέου δειγματολήπτη με αρκετά μεγαλύτερο μήκος από το αρχικό του δειγματολήπτη της Cambustion, ακολουθήθηκε η πιο κάτω διαδικασία.

Στο πρώτο στάδιο ανάπτυξης επιλέχθηκε το υλικό κατασκευής του με βάση την εφαρμογή και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια έγινε μια πρώτη εκτίμηση της διαμέτρου του δειγματολήπτη και ακολούθησε θερμοδυναμική ανάλυση για να εξακριβωθεί εάν το προτεινόμενο μήκος δεν θα επηρεάσει την λειτουργία του δειγματολήπτη και την ακρίβεια της μέτρησης. Οι διαστάσεις που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός προτύπου δειγματολήπτη.

Στο δεύτερο στάδιο της ανάπτυξης ο δειγματολήπτης υποβλήθηκε σε δοκιμές οι οποίες περιλάμβαναν πειράματα σε τράπεζα δοκιμών.

Στο τελικό στάδιο της ανάπτυξης ο δειγματολήπτης υποβλήθηκε σε πειράματα υπό κανονικές συνθήκες καύσης.

Ενώ στο πρώτο στάδιο έγιναν αρχικές εκτιμήσεις για τις διαστάσεις που οδήγησαν στην κατασκευή του δειγματολήπτη, οι δοκιμές που έγιναν στο δεύτερο και τρίτο στάδιο της ανάπτυξης βελτίωσαν περαιτέρω τις σχεδιαστικές παραμέτρους του δειγματολήπτη και είχαν ως απώτερο σκοπό την κατασκευή ενός δειγματολήπτη με ακρίβεια και ταχεία μέτρηση των NOx.

4.2. Θερμοδυναμική ανάλυση δειγματολήπτη

Η κατασκευή ενός δειγματολήπτη με ευρύ πεδίο εφαρμογών προϋποθέτει καλή γνώση των συνθηκών κάτω από τις οποίες γίνεται η μέτρηση. Οι συνθήκες αυτές (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, κ.α.) καθορίζουν τις σχεδιαστικές παραμέτρους του δειγματολήπτη από τις οποίες οι πιο βασικές είναι το υλικό κατασκευής, η διάμετρος και το μήκος. Η αρχική επιλογή αυτών των παραμέτρων έγινε με την ανάλυση που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

4.2.1 Υλικό κατασκευής

Η επιλογή του υλικού κατασκευής του δειγματολήπτη καθορίζεται από την μέγιστη θερμοκρασία των αέριων που εισέρχονται σε αυτόν, από τον συντελεστή θερμικής διαστολής και από την τραχύτητα της επιφάνειας.

Ο αρχικός δειγματολήπτης της Cambustion είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι. Όμως, ο δειγματολήπτης υπό μελέτη θα έχει σημαντικά μεγαλύτερο μήκος. Συνεπώς, το πρόβλημα που αναμένεται από τη χρήση ανοξείδωτου ατσάλιου είναι η εναπόθεση σωματιδίων κατά το μήκος του δειγματολήπτη που μπορούν να προκαλέσουν μερική ή και ολική φραγή του δειγματολήπτη. Για να αποφευχθεί μια τέτοια περίπτωση και μετά από έρευνα σε παρόμοιες εφαρμογές, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί πυριτικό γυαλί οι ιδιότητες του οποίου αναφέρονται στον πίνακα 4.1, μαζί με αυτές για ανοξείδωτο ατσάλι, για λόγους σύγκρισης. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στους πίνακες ιδιοτήτων των δυο υλικών στο παράρτημα 2. Το πυριτικό γυαλί έχει σημαντικά χαμηλότερη τραχύτητα επιφάνειας (surface roughness). Η λεία επιφάνεια αναμένεται να μειώσει σημαντικά την εναπόθεση (deposition) των διαφόρων σωματιδίων που περιέχονται στα καυσαέρια.

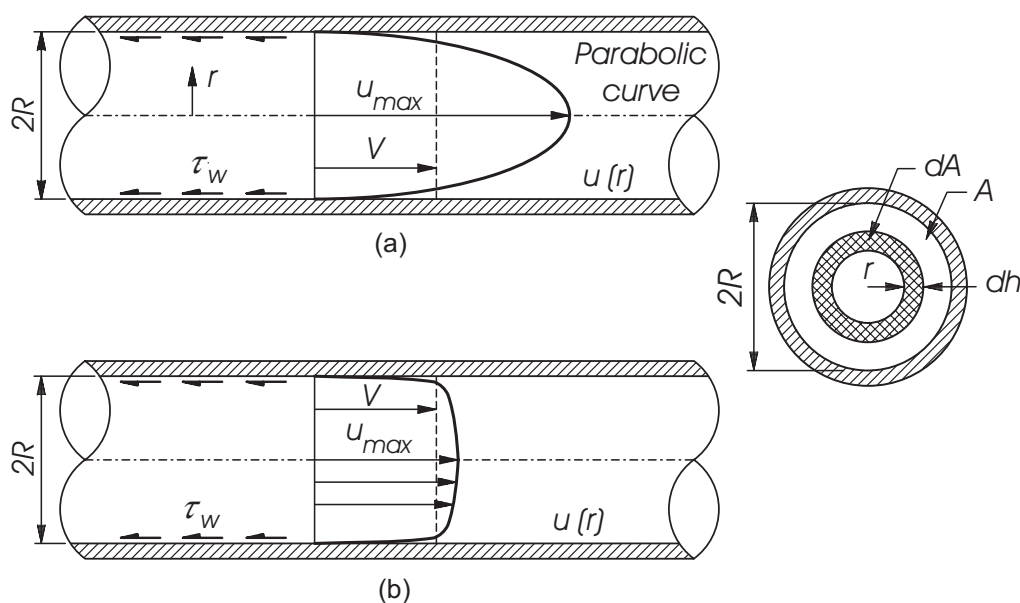
Μελέτες από διάφορους ερευνητές [5, 6] απέδειξαν μετά από δοκιμές διαφόρων υλικών ότι οι δειγματολήπτες από πυριτικό γυαλί δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την ακρίβεια της μέτρησης και την αξιοπιστία της κατασκευής, όταν χρησιμοποιήθηκαν σε περιβάλλον παρόμοιο με αυτό της υπό εξέταση περίπτωσης.

ΥΛΙΚΟ		ΠΥΡΙΤΙΚΟ ΓΥΑΛΙ	ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΑΤΣΑΛΙ
ΙΔΙΟΤΗΤΑ			
Density	(kg/m ³)	2.2x10 ³	8 x10 ³
Coefficient of Thermal Expansion	(m/m °C)	55 x 10 ⁻⁶	16,5 x 10 ⁻⁶
Thermal Conductivity	(W/m °C)	1.4	16,3
Specific Heat	(J/kg °C)	670	500
Max. Operating Temperature	(°C)	1000	1150
Surface Roughness	(nm)	2.5	950

Πίνακας 4.1. Ιδιότητες υλικών κατασκευής δειγματολήπτη

4.2.2 Διάμετρος δειγματολήπτη

Ο πρότυπος δειγματολήπτης της Cambustion έχει διάμετρο 0,58mm. Η διάμετρος επηρεάζει τη παροχή, την θερμοκρασία και πίεση των αερίων που φτάνουν στο θάλαμο χημικής φωταύγειας για την μέτρηση των NOx.



Σχήμα 4.1. Κατανομή ταχύτητας πλήρους αναπτυγμένης ροής σε αγωγό:

(α) στρωτή, (β) τυρβώδης ροή

Η διάμετρος επηρεάζει επίσης το είδος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης) των αερίων. Το είδος της ροής επομένως επηρεάζει την ταχύτητα των αερίων που ταξιδεύουν προς τον θάλαμο χημικής φωταύγειας. Η διάκριση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής γίνεται με βάση τον αριθμό Reynolds. Για στρωτή ροή $Re \leq 2500$ ενώ για τυρβώδη $Re > 2500$. Το πεδίο ταχύτητας του ρευστού μέσα στον αγωγό για πλήρως αναπτυγμένη ροή (velocity profile for fully developed flow) διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δυο ειδών ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Για ταχύτερη δειγματοληψία, η ροή στο δειγματολήπτη πρέπει να είναι τυρβώδης λόγω των υψηλότερων ταχυτήτων που επιτυγχάνονται μέσα στον αγωγό.

Για να γίνει μια αρχική εκτίμηση της διαμέτρου του δειγματολήπτη, κατάλληλη ώστε να προκαλέσει τυρβώδη ροή και συνεπώς ταχεία δειγματοληψία, χρησιμοποιήθηκαν οι συνθήκες του πίνακα 4.2. Οι συνθήκες αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν την χειρότερη δυνατή περίπτωση, σχετικά χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, ώστε να μην ευνοείται η ανάπτυξη τυρβώδους ροής μέσα στον αγωγό. Στην ανάλυση αυτή εξετάστηκαν διάφορες τιμές διαμέτρων. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν τους υπολογισμούς με διάμετρο 1mm, η οποία τελικά επιλέχθηκε για την κατασκευή του δειγματολήπτη.

Πίεση στο σημείο δειγματοληψίας	P	1.5	bar
Θερμοκρασία στο σημείο δειγματοληψίας	T	650	K
Παροχή αερίων στον αγωγό	m	0,21	Kg/s
Σταθερά αερίων	R	287	J/KgK
Διάμετρος αγωγού	D	50	mm
Επιφάνεια αγωγού	A	0,02	m ²
Διάμετρος δειγματολήπτη	d	1	mm

Πίνακας 4.2. Συνθήκες αερίων στο σημείο δειγματοληψίας

Παραδοχές:

α) Τέλειο αέριο, μόνιμη ροή

β) Η ταχύτητα των αερίων στο χώρο της δειγματοληψίας (ΧΔ) ισούται με την ταχύτητα στην είσοδο του δειγματολήπτη (ΕΔ), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.

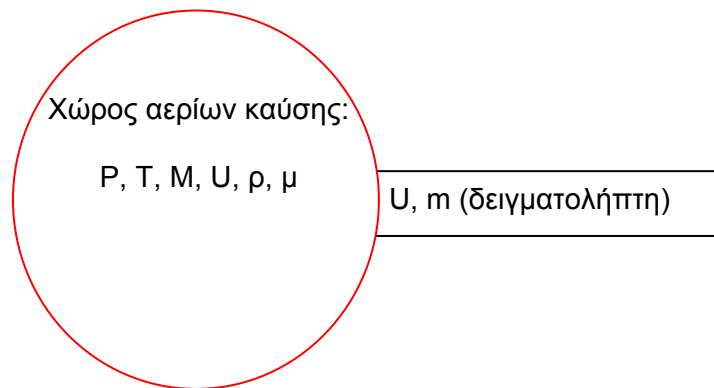
Σύμβολα:

ΧΔ - χώρος δειγματοληψίας

ΕΔ - είσοδο του δειγματολήπτη

Δ - δειγματολήπτης

ΑΚ - Αέρια καύσης



Σχήμα 4.2. Σχηματική απεικόνιση του χώρου με αέρια καύσης και των συνθηκών τους στην είσοδο του δειγματολήπτη

Καταστατική εξίσωση: $P = \rho RT \Rightarrow \rho = \frac{P}{RT} \quad \dots(1)$

Εξίσωση συνέχειας: $\dot{m} = \rho U A \Rightarrow U = \frac{\dot{m}_{αερίων ΧΔ}}{\rho A_{ΧΔ}} \quad \dots(2)$

Εφόσον, $U_{αερίων ΧΔ} = U_{αερίων ΕΔ}$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\alpha\epsilon\rho\iota\omega\nu\ X\Delta} = \rho U A_{\Delta}$$

$$\nu = \frac{\rho}{\mu} \quad \dots(3)$$

Από [9]:

$$\mu_{\text{AK}} = 1.384 \times 10^{-5} + 2.68 \times 10^{-8} T_{\text{AK}} \quad \dots(4)$$

Εξίσωση Reynolds:
$$\text{Re} = \frac{U d}{\nu} = \frac{\dot{m}_{\alpha\epsilon\rho\iota\omega\nu\ E\Delta} d_{\Delta}}{A_{\Delta} \mu} \quad \dots(5)$$

Όπου:

P – Πίεση (Pressure)

R – Σταθερά αερίων (Universal Gas constant)

T – Θερμοκρασία (Temperature)

ρ – Πυκνότητα (Density)

\dot{m} – Παροχή μάζας (Mass flow rate)

U – Ταχύτητα (Velocity)

Re – Αριθμός Reynolds

ν – Κινηματική συνεκτικότητα / Ιξώδες (Kinematic viscosity)

μ – Δυναμική συνεκτικότητα (Dynamic viscosity)

D – Διάμετρος αγωγού

d – Διάμετρος δειγματολήπτη (Tube diameter)

Η ταχύτητα των αερίων καύσης στην είσοδο του δειγματολήπτη σύμφωνα με τις εξισώσεις (1) και (2) είναι:

$$U = 133 \text{ m/s}$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (5), ο αριθμός Reynolds υπολογίστηκε:

$$Re = 3425$$

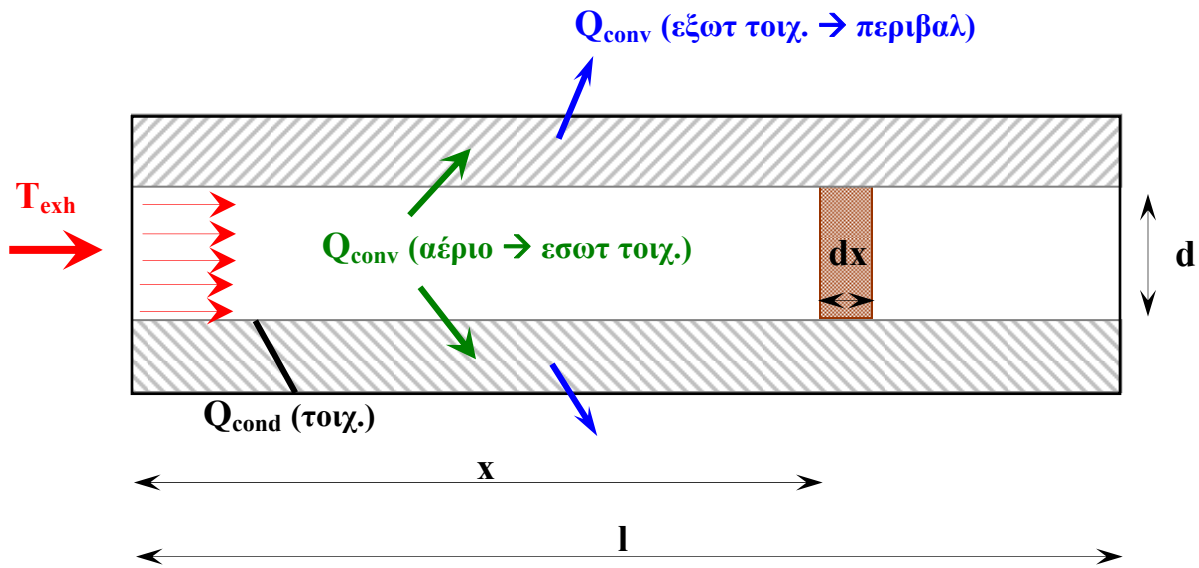
Από την τιμή του αριθμού Reynolds προκύπτει ότι η ροή που θα αναπτυχθεί στον δειγματολήπτη διαμέτρου 1mm, σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και χαμηλής ταχύτητας αερίων καύσης, θα είναι τυρβώδης. Επομένως, για υψηλότερες πιέσεις, η ταχύτητα στην είσοδο του δειγματολήπτη θα είναι ακόμα μεγαλύτερη οπότε και η ροή τυρβώδης.

4.2.3 Μήκος δειγματολήπτη

Στόχος της ανάπτυξης του νέου δειγματολήπτη είναι η ευρύτητα του φάσματος εφαρμογής του. Αυτό προϋποθέτει ότι για να είναι εφικτή η πρόσβαση του άκρου του δειγματολήπτη κοντά στην εστία μεγάλου μεγέθους μηχανημάτων ή σε καμινάδες μεγάλης διαμέτρου χρειάζεται να έχει μήκος τουλάχιστον 600mm περίπου.

Λόγω της αύξησης του μήκους του δειγματολήπτη, είναι αναμενόμενο ότι η θερμοκρασία των αερίων, που ταξιδεύουν μέσα στον δειγματολήπτη, θα μειωθεί λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τον δειγματολήπτη προς το περιβάλλον. Η μεγαλύτερη πτώση θερμοκρασίας θα συμβεί στην αρχή της μέτρησης όπου η θερμοκρασία των υλικών του δειγματολήπτη είναι ακόμα χαμηλή (συγκεκριμένα στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος). Σημαντική πτώση θερμοκρασίας των αερίων (κάτω από 190°C) μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση νερού ή ακόμα και συμπύκνωση υδρογονανθράκων με αποτέλεσμα να επηρεάσουν την λειτουργία του αναλυτή και συνεπώς τη μέτρηση των NOx.

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των αερίων που εισέρχονται στον ΘΧΦ, (δηλαδή, της πτώσης στη θερμοκρασία των αερίων από την είσοδο τους στον δειγματολήπτη μέχρι την είσοδο τους στον ΘΧΦ) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω μοντελοποίηση του δειγματολήπτη [7].



Σχήμα 4.3. Μεταφορά θερμότητας από τα αέρια στον δειγματολήπτη και στη συνέχεια στο περιβάλλον

Η συναλλαγή θερμότητας στον δειγματολήπτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. γίνεται:

- α) δια συναγωγής, από τα αέρια προς την εσωτερική επιφάνεια του δειγματολήπτη,
- β) δια αγωγής, από την εσωτερική επιφάνεια στην εξωτερική επιφάνεια του δειγματολήπτη και
- γ) δια συναγωγής, από την εξωτερική επιφάνεια του δειγματολήπτη προς το περιβάλλον

Κατά την διέλευση των καυσαερίων μέσα από τον δειγματολήπτη η θερμοκρασία τους μειώνεται κατά μήκος του δειγματολήπτη, λόγω μεταφοράς θερμότητας. Το πεδίο θερμοκρασιών κατά μήκος του δειγματολήπτη δεν είναι ομοιόμορφο (non uniform temperature distribution), συνεπώς η μεταφορά θερμότητας δεν είναι επίσης ομοιόμορφη, όποτε για τον υπολογισμό της εφαρμόζεται ενεργειακός ισολογισμός (energy balance) σε ένα στοιχειώδες μήκος dx (σχήμα 4.3):

$$h_{total} dA(T_{exh,x} - T_{surr}) = (m C_p)_{gas} \frac{dT_{exh,x}}{dA} dA \quad \dots(4)$$

Αναδιατάσσοντας και ολοκληρώνοντας την εξίσωση (4) προκύπτει:

$$\int_{T_{exh,0}}^{T_{exh,x}} \left(\frac{dT_{exh,x}}{T_{exh,x} - T_{surr}} \right) = \int_0^{A_s} \frac{h_{total} dA_s}{-(mC_p)} \quad \dots(5)$$

$$\log_e \left(\frac{T_{exh,x} - T_{surr}}{T_{exh,0} - T_{surr}} \right) = - \frac{h_{total} A_s}{(mC_p)} \quad \dots(6)$$

$$T_{exh,x} = T_{surr} + (T_{exh,0} - T_{surr}) \exp \left(- \frac{h_{total} A_s}{(mC_p)} \right) \quad \dots(7)$$

Η θερμοκρασία των αερίων σε συνάρτηση με το μήκος του δειγματολήπτη δίνεται προσεγγιστικά από την εξίσωση (7).

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των αερίων στην έξοδο του δειγματολήπτη χρησιμοποιείται ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας h_{total} , που δίνεται από τη σχέση (8), η οποία στηρίζεται στη θεώρηση μιας ισοδύναμης θερμικής αντίστασης (thermal resistance analogy) [8].

$$\frac{1}{h_{total}} = \frac{k}{\frac{k}{h_{inner}} + \delta + \frac{k}{h_{outer}}} \quad \dots(8)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεταφορά θερμότητας δια αγωγής είναι σημαντικά μικρότερη από τη μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής. Συνεπώς η μεταφορά θερμότητας δια αγωγής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, οπότε η σχέση (8) μετατρέπεται στη σχέση (9).

$$\frac{1}{h_{total}} = \frac{1}{h_{inner}} + \frac{1}{h_{outer}} \quad \dots(9)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του δειγματολήπτη χρησιμοποιείται η σχέση (11) του Dittus Boelter [8], όπου ο αριθμός Nusselt δίνεται από την σχέση (10).

$$Nu = 0.26 (Re)^{0.6} \quad \dots(10)$$

$$Nu = \frac{h_{inner} d}{k} \quad \dots(11)$$

$$Re = \frac{U d}{\nu} \quad \dots(12)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας του δειγματολήπτη και του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται η σχέση (13).

$$h_{outer} = \frac{Nu k}{l} \quad \dots(13)$$

όπου,

$T_{exh,x}$ - Θερμοκρασία αερίων στο μήκος X

T_{surr} - Θερμοκρασία περιβάλλοντος

A - επιφάνεια δειγματολήπτη σε επαφή με τα αέρια

h_{total} - ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

h_{inner} - συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής στο εσωτερικό του δειγματολήπτη

h_{outer} - συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δια συναγωγής στο εξωτερικό του δειγματολήπτη

mC_p - ολική θερμοχωρητικότητα αερίων

Nu - αριθμός Nusselt

Re - αριθμός Reynolds

k - συντελεστής αγωγιμότητας αερίων

U - ταχύτητα ρευστού

ν - Κινηματική συνεκτικότητα (ιξώδες) ρευστού

d - διάμετρος δειγματολήπτη

l - μήκος δειγματολήπτη

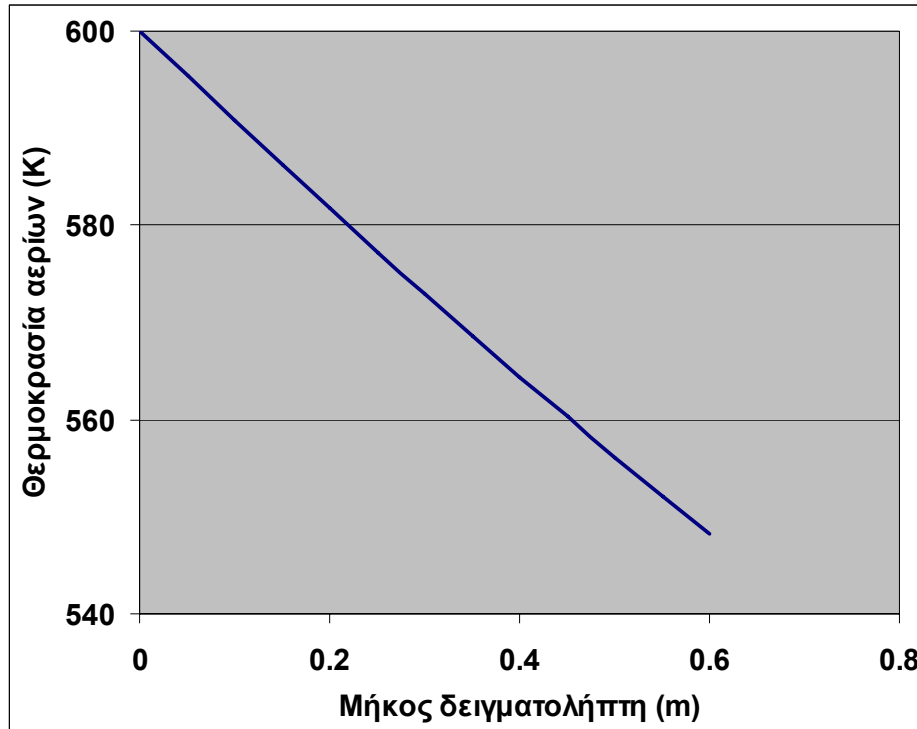
Παραδοχές:

1. Το άκρο του δειγματολήπτη βρίσκεται στη θερμοκρασία των καυσαερίων, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
2. Ο υπολογισμός αφορά την αρχή της μέτρησης όπου η θερμοκρασία των υλικών του δειγματολήπτη είναι στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
3. Ο δειγματολήπτης είναι κατασκευασμένος από πυριτικό γυαλί (δεν βρίσκεται μέσα στο μεταλλικό κέλυφος).

Πίεση στο σημείο δειγματοληψίας	P	3	bar	
Θερμοκρασία στο σημείο δειγματοληψίας	$T_{exh,0}$	600	K	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	T_{surr}	293	K	
Παροχή αερίων στον αγωγό	M	0,57	Kg/s	
Παροχή μάζας στον δειγματολήπτη	m	0.000228	Kg/s	Υπολογ. από § 4.2.2
Πυκνότητα αερίων	ρ	0,4564	Kg/m ³	Από [9]
Θερμοχωρητικότητα	C_p	1091.6	J/KgK	Από [9]
Κινηματική συνεκτικότητα (ιξώδες)	ν	0,00007782	m ² /s	Από [9]
Θερμική αγωγιμότητα αερίων	κ	0,035	W/mK	Από [9]
Αριθμός Reynolds	Re	9712		Υπολογ. από § 4.2.2
Μήκος δειγματολήπτη	l	600	mm	
Διάμετρος δειγματολήπτη	d	1	mm	

Πίνακας 4.3. Συνθήκες στο σημείο δειγματοληψίας και δεδομένα για την περίπτωση υπό εξέταση

Η πτώση της θερμοκρασίας των αέριων κατά μήκος του δειγματολήπτη με βάση την ανάλυση μεταφοράς θερμότητας, σύμφωνα με τις παραδοχές και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν (πίνακας 4.3), φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4. Εκτίμηση της πτώσης της θερμοκρασίας από την είσοδο μέχρι την έξοδο του δειγματολήπτη

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα αέρια θερμοκρασίας 600K που εισέρχονται στον δειγματολήπτη εξέρχονται στους 550K. Η πτώση της θερμοκρασίας από τη απώλεια θερμότητας κατά μήκος του δειγματολήπτη εκτιμήθηκε στους 50°C. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας του δειγματολήπτη, όπως αναφέρεται από τις τρεις παραδοχές που έγιναν και από τις συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς. Υπό κανονικές συνθήκες μέτρησης ένα σημαντικό μέρος του δειγματολήπτη βρίσκεται μέσα στο χώρο των αερίων καύσης και συνεπώς δεν βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως αναφέρεται στις παραδοχές. Επίσης το πυριτικό γυαλί θα βρίσκεται μέσα σε μεταλλικό κέλυφος. Η ανάλυση δείχνει ότι τα αέρια θα εισέλθουν στο ΘΧΦ με μια σχετικά μικρή πτώση στη θερμοκρασία τους, η οποία δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια της μέτρησης NOx. Συνεπώς, ο δειγματολήπτης με μήκος 600mm μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλος για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

4.3 Κατασκευή δειγματολήπτη

Από την θεωρητική ανάλυση της παραγράφου 4.2 προέκυψαν ότι:

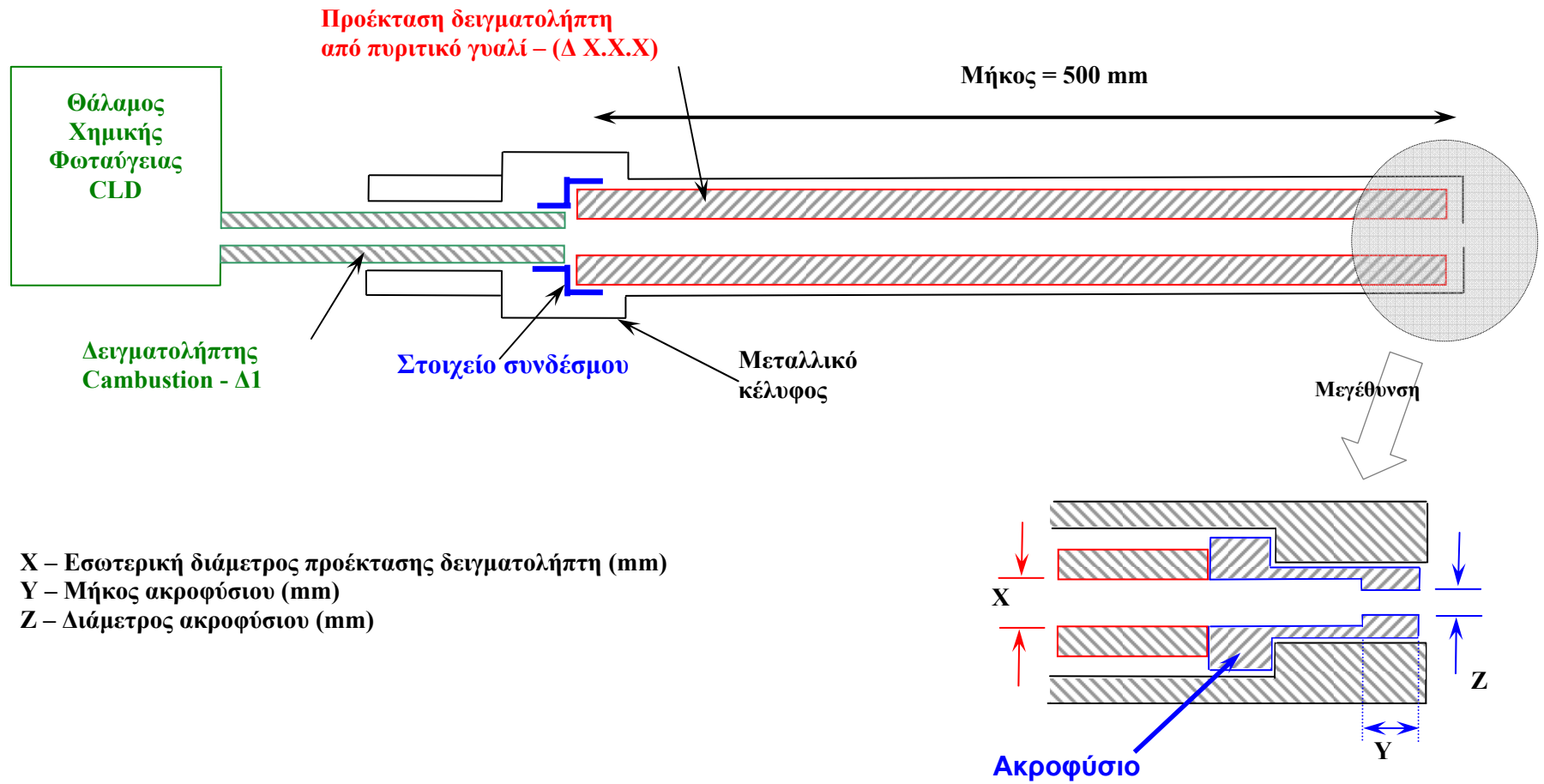
- α) το υλικό του δειγματολήπτη θα είναι πυριτικό γυαλί,
- β) το μήκος του θα αυξηθεί από 100mm σε 600mm και
- γ) η διάμετρος που θα εξεταστεί αρχικά θα είναι 1mm.

Με αυτά τα δεδομένα τα τμήματα του δειγματολήπτη που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν φαίνονται αναλυτικά στο σχήμα 4.5 και είναι:

- I) Το τμήμα επιμήκυνσης του δειγματολήπτη μήκους 500mm (Υλικό κατασκευής και εσωτερική διάμετρος)
- II) Ακροφύσιο (μήκος και εσωτερική διάμετρος)
- III) Κέλυφος δειγματολήπτη
- IV) Στοιχείο συνδέσμου

Ο κανονικός δειγματολήπτης της Cambustion (100mm) εισέρχεται μέσα σε ένα ειδικό μεταλλικό κέλυφος όπου με ένα στοιχείο συνδέσμου έρχεται σε επαφή με την προέκταση των 500mm. Στο άκρο του δειγματολήπτη τοποθετήθηκε ένα ακροφύσιο για την εκτόνωση τυχόν κυμάτων πίεσης (pressure pulsations) των αερίων υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας.

Στο παράρτημα 3 δίνονται όλα τα τεχνικά σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τμημάτων του δειγματολήπτη. Δίνονται επίσης και εικόνες από την στερεά μοντελοποίηση των τμημάτων αυτών, στις θέσεις άρθρωσης και εξάρμωσης του δειγματολήπτη.



Σχήμα 4.5. Σχηματική απεικόνιση του επεκτεινόμενου δειγματολήπτη

Τύπος	Παράμετροι σχεδίασης Δειγματολήπτη	
Δ1	Πρότυπος Δειγματολήπτης Cambustion	
	Μήκος δειγματολήπτη = 100 mm Εξωτερική διάμετρος δειγματολήπτη = 4 mm Εσωτερική διάμετρος δειγματολήπτη = 0.58 mm Υλικό κατασκευής δειγματολήπτη = St. Steel	
Δ2	Προέκταση δειγματολήπτη	
	Μήκος δειγματολήπτη = 500 mm Εξωτερική διάμετρος δειγματολήπτη = 12 mm Υλικό κατασκευής περιβλήματος δειγματολήπτη = St. Steel	
	Δ 2.X	Δ 3.X
	Εσωτερική διάμ. δειγμ/πτη = 1, 1.2 mm Διάμετρος ακροφύσιου = 0.5, 0.8 mm Μήκος ακροφύσιου = 5 mm Υλικό δειγματολήπτη = Quartz Glass	Εσωτερική διάμ. δειγμ/πτη = 1.2 mm Διάμετρος ακροφύσιου = 0.5, 0.8, 1 mm Μήκος ακροφύσιου = 1 mm Υλικό δειγματολήπτη = Quartz Glass

Πίνακας 4.4. Βασικοί παράμετροι σχεδίασης δειγματολήπτη

Η κατασκευή ενός δειγματολήπτη προϋποθέτει πολύ καλή γνώση των συνθηκών και της κατάστασης του ρευστού στο σημείο της δειγματοληψίας [10, 11]. Η πίεση, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ρευστού σε σχέση με τις διαστάσεις του δειγματολήπτη καθορίζουν την ακρίβεια και ποιότητα της μέτρησης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι διαστάσεις X, Y και Z (σχήμα 4.5) είναι αυτές που επηρεάζουν άμεσα τη δειγματοληψία.

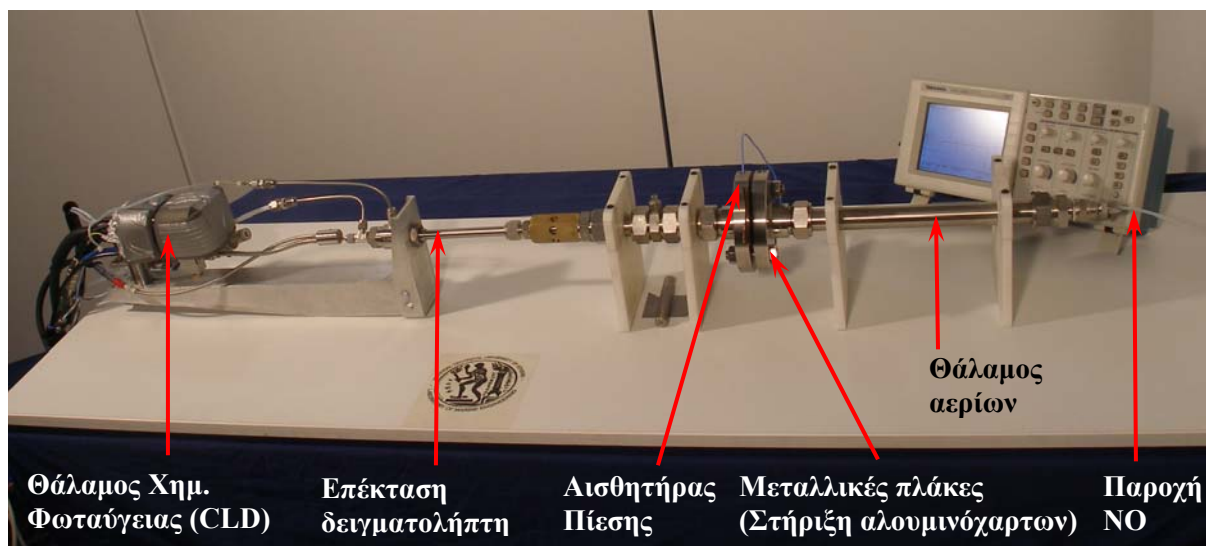
Σε αυτή τη φάση ανάπτυξης του δειγματολήπτη προτεραιότητα είχε ο προσδιορισμός της διάστασης X, με βάση τις προδιαγραφές που θα έχει ο νέος δειγματολήπτης, δηλαδή χρόνο απόκρισης συστήματος περίπου 10ms και μήκος δειγματολήπτη 600mm.

Στον πίνακα 4.4 δίνονται οι διαστάσεις του προτύπου δειγματολήπτη της Cambustion (για λόγους σύγκρισης) και οι διαστάσεις της προέκτασης του δειγματολήπτη που εξετάστηκαν σε μια τράπεζα δοκιμών, η οποία κατασκευάστηκε ειδικά για την διερεύνηση λειτουργίας νέων σχεδίων του δειγματολήπτη.

5. Πειραματική διερεύνηση στην τράπεζα δοκιμών

5.1 Κατασκευή της τράπεζας δοκιμών και διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

Για την διερεύνηση της λειτουργίας του νέου δειγματολήπτη κατασκευάστηκε μια τράπεζα δοκιμών, της οποίας τα κύρια μέρη απεικονίζονται στο σχήμα 5.1. Ο αρχικός δειγματολήπτης της Cambustion έχει τοποθετηθεί μέσα στον καινούργιο δειγματολήπτη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Δυο στηρίγματα συγκρατούσαν τον δειγματολήπτη πάνω στη τράπεζα. Στο άκρο του δειγματολήπτη βρίσκονται δυο μεταλλικές πλάκες οι οποίες στηρίζουν και συμπιέζουν συγκεκριμένο αριθμό πολύ λεπτών ελασμάτων αλουμινίου. Στην άλλη μεριά των πλακών βρίσκεται ένας θάλαμος αερίων στον οποίο εισέρχεται αέριο γνωστής περιεκτικότητας NO, υπό ελεγχόμενη πίεση.



Σχήμα 5.1. Τράπεζα δοκιμών δειγματολήπτη

Η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων στην τράπεζα δοκιμών είναι η ακόλουθη: Αέριο γνωστής περιεκτικότητας NO εισέρχεται στο θάλαμο αερίων. Η πίεση του αερίου είναι προκαθορισμένη όπως και ο αριθμός των αλουμινοχαρτων που τοποθετούνται μεταξύ των δυο πλακών. Το αέριο NO, υπό συγκεκριμένη πίεση, προκαλεί ρήξη των λεπτών ελασμάτων αλουμινίου με αποτέλεσμα να τα διαπεράσει και να εισέλθει στο άκρο του δειγματολήπτη. Το NO μέσα από τον δειγματολήπτη καταλήγει στο θάλαμο χημικής φωταύγειας όπου και αρχίζει η μέτρηση των NO από τον αναλυτή.

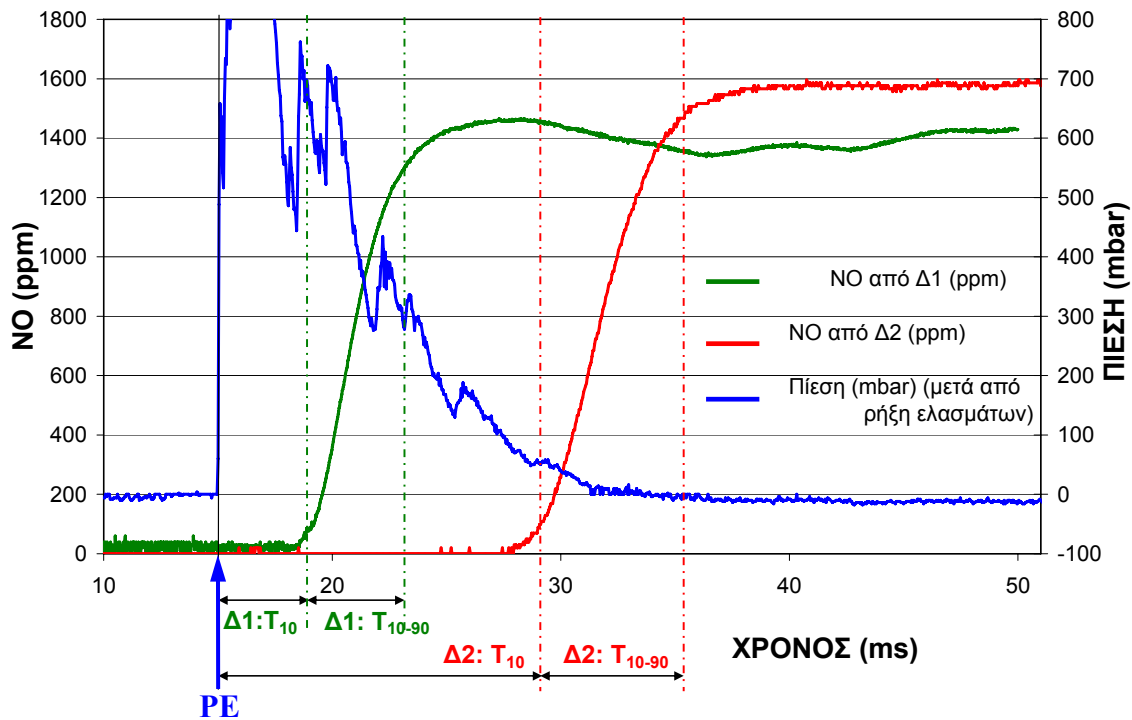
Ο αριθμός των ελασμάτων είναι ευθέως ανάλογος με τη πίεση του αερίου NO. Όσα περισσότερα ελάσματα τοποθετηθούν μεταξύ των δυο πλακών τόσο μεγαλύτερη πίεση χρειάζεται για να προκληθεί ολική ρήξη τους. Μεταβάλλοντας τον αριθμό των ελασμάτων (συνεπώς και της πίεσης του αερίου) μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της πίεσης στη μέτρηση NO (δηλαδή, στον χρόνο απόκρισης της μέτρησης).

Ο δειγματολήπτης τοποθετείται πίσω ακριβώς από τα ελάσματα. Η ρήξη των ελασμάτων λόγω της υψηλής πίεσης συμβαίνει ακαριαία και επιτρέπει στο αέριο NO να εισέλθει αμέσως στον δειγματολήπτη. Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό να αναπαραστήσει στην τράπεζα δοκιμών το αντίστοιχο φαινόμενο (δηλαδή της εισόδου των αερίων μέσα στον δειγματολήπτη μόλις εξέλθουν από τον θάλαμο καύσης) σε μια κανονική μηχανή ή καυστήρα.

Για τον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης του συστήματος τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας πίεσης αμέσως μετά τα ελάσματα αλουμινίου, στη μεριά της πλάκας που είναι τοποθετημένος ο δειγματολήπτης (σχήμα 5.1). Ο ρόλος του αισθητήρα είναι να μετρήσει την ακαριαία αύξηση της πίεσης όταν γίνει η ρήξη των ελασμάτων, η οποία αντιπροσωπεύει την είσοδο των αερίων στον δειγματολήπτη και συνεπώς την έναρξη της μέτρησης. Η αύξηση της πίεσης χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς για την έναρξη της μέτρησης και τον υπολογισμό του χρόνου απόκρισης του συστήματος μέτρησης NOx.

5.2. Ανάλυση αποτελεσμάτων της τράπεζας δοκιμών

Οι πρώτες δοκιμές έγιναν με τον πρότυπο δειγματολήπτη της Cambustion ($\Delta 1$) και τον πρώτο δειγματολήπτη με επέκταση ($\Delta 2.1$) που κατασκευάστηκε. Τα συγκριτικά αποτελέσματα των δυο δειγματοληπτών απεικονίζονται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2. Σύγκριση χρόνων απόκρισης των δειγματοληπτών $\Delta 1$ και $\Delta 2.1.1$

Ο κατακόρυφος άξονας στα αριστερά του διαγράμματος είναι σε κλίμακα 'ppm' και μετρά την ποσότητα NO που μετρήθηκε κατά τη δοκιμή. Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε αέριο περιεκτικότητας NO 1400 ppm και 1600 ppm, για τον $\Delta 1$ και $\Delta 2.1.1$., αντίστοιχα.

Ο κατακόρυφος άξονας στα δεξιά μετρά την πίεση σε 'mbar' όπως μετρήθηκε από τον αισθητήρα πίεσης που είναι τοποθετημένος στην αριστερή μεταλλική πλάκα που στηρίζει τα ελάσματα αλουμινίου. Η μπλε καμπύλη στο σχήμα 5.2 δείχνει την ακαριαία αύξηση της πίεσης όταν γίνεται η ρήξη των ελασμάτων (PE). Το σημείο PE συμβολίζει τη χρονική στιγμή που το αέριο NO εισέρχεται στο άκρο του δειγματολήπτη οπότε και συμβολίζει την αρχή της μέτρησης. Οι χρόνοι απόκρισης του μετρητικού συστήματος (T_{10} και T_{10-90}) υπολογίζονται από το σημείο αναφοράς PE και τις καμπύλες NO.

Συγκρίνοντας τις δυο καμπύλες είναι εμφανές ότι ο Δ1 έχει ταχεία απόκριση ($T_{10} \approx 4\text{ms}$ και $T_{10-90} \approx 5\text{ms}$) ενώ με τη χρήση της προέκτασης οι χρόνοι του Δ2.1.1 είναι σημαντικά υψηλότεροι ($T_{10} \approx 15\text{ms}$ και $T_{10-90} \approx 8\text{ms}$). Η αύξηση του χρόνου απόκρισης T_{10-90} είναι σημαντική επειδή καθορίζει τη ποσότητα των ΝΟ που μετριοούνται. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης των ΝΟ τόσο πιο μικρός ο χρόνος T_{10-90} .

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παράμετροι Χ, Υ και Ζ του δειγματολήπτη (σχήμα 4.5) χρειάζονται βελτίωση ώστε να μειωθούν οι χρόνοι T_{10} και T_{10-90} .

Σημαντική προϋπόθεση για την λειτουργία του δειγματολήπτη είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε συνθήκες καύσης υπό ατμοσφαιρική πίεση (καυστήρες), όσο και σε συνθήκες υψηλής πίεσης, μέχρι και 3 bar (σύστημα εξαγωγής ΜΕΚ).

Σε συνθήκες υψηλής πίεσης αναμένεται να υπάρξει κάποια επίδραση της διακύμανσης της πίεσης στη δειγματοληψία. Η διερεύνηση στη τράπεζα δοκιμών αποσκοπούσε στο να μελετηθούν οι διάφοροι σχεδιαστικοί παράμετροι του δειγματολήπτη, σε σχέση με την διακύμανση της πίεσης.

Τα αποτελέσματα από τα πειράματα που αναφέρονται στη συνέχεια αφορούν δειγματολήπτες με διαφορετικές κατασκευαστικές παραμέτρους αλλά ταυτόχρονα και δοκιμές υπό διαφορετικές πιέσεις. Οι διακυμάνσεις της πίεσης στην είσοδο του δειγματολήπτη σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας προκαλούνται από τα διαφορετικά φορτία λειτουργίας και συνεπώς τις διαφορετικές συνθήκες καύσης (θερμοκρασία και πίεση). Οι διακυμάνσεις αυτές επηρεάζουν το χρόνο απόκρισης του μετρητικού συστήματος και την ποσότητα μέτρησης ΝΟx. Η διακύμανση της πίεσης στην τράπεζα δοκιμών επιτεύχθηκε μεταβάλλοντας τον αριθμό των λεπτών ελασμάτων αλουμινίου.

Οι κατασκευαστικές διαφορές των δειγματοληπτών που εξετάστηκαν προαναφέρθηκαν στον πίνακα 4.4, αλλά αντιπαραβάλλονται λεπτομερώς στον πίνακα 5.1

Τα αποτελέσματα που είχε η επίδραση της πίεσης στο χρόνο απόκρισης κάθε δειγματολήπτη φαίνονται στα σχήματα 5.3 μέχρι 5.11.

Τύπος Δειγματ.	Μήκος Δειγματολήπτη (mm)	Εξωτερική Διάμετρος (mm)	Εσωτερική Διάμετρος (mm) X	Εσωτερική Διάμετρος Ακροφύσιου (mm) Z	Μήκος Ακροφύσιου (mm) Y	Εξωτερικό υλικό κατασκευής	Εσωτερικό υλικό κατασκευής
Δ1	100	4	0.58	2.0	-	ανοξείδωτο ατσάλι	ανοξείδωτο ατσάλι
Δ2.1	600	12	1	0.5	5	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ2.2	600	12	1	0.8	5	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ2.3	600	12	1.2	0.8	5	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ2.4	600	12	1.2	0.5	5	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ3.1	600	12	1.2	0.5	1	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ3.2	600	12	1.2	0.8	1	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ3.3	600	12	1	0.8	1	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί
Δ3.4	600	12	1.2	1.0	1	ανοξείδωτο ατσάλι	πυριτικό γυαλί

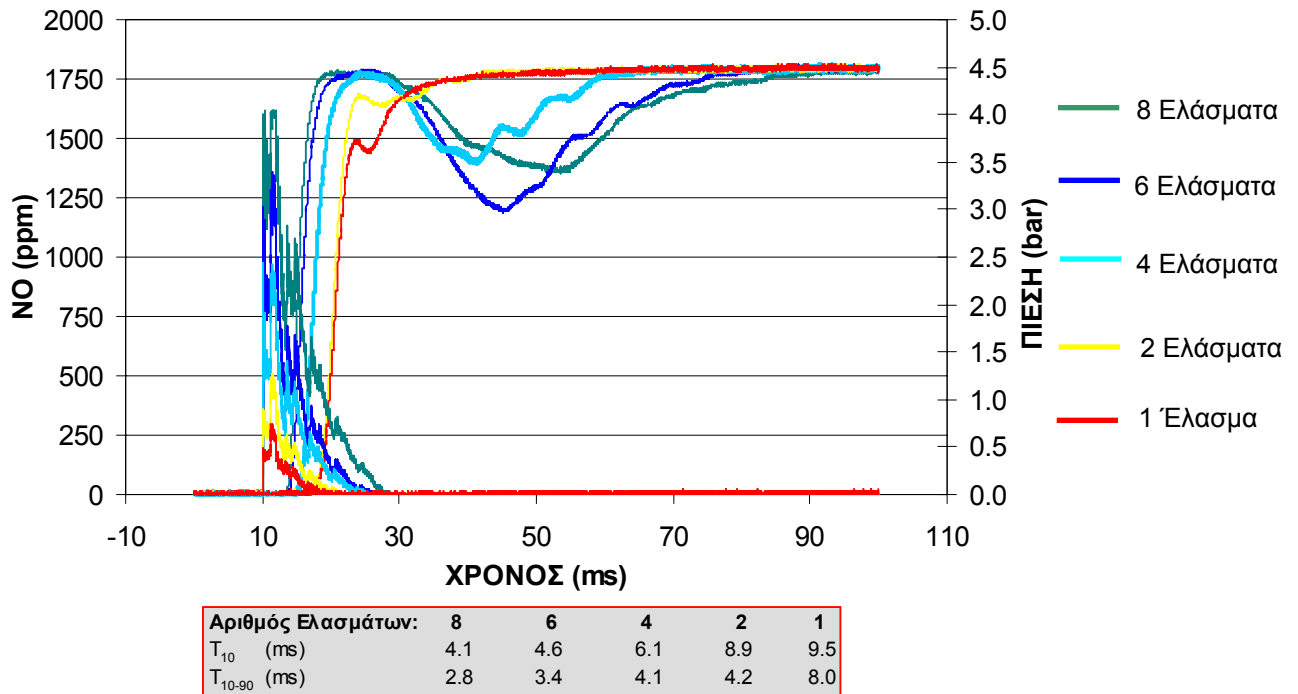
Πίνακας 5.1. Κατασκευαστικές διαφορές μεταξύ δειγματοληπτών

Η πρώτη δοκιμή αφορούσε τον δειγματολήπτη της Combustion (τύπο Δ1) τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο σχήμα 5.3. Ο αριθμός των ελασμάτων, η αντίστοιχη πίεση και τα NO που μετρήθηκαν διευκρινίζονται με υπόμνημα χρωμάτων στα δεξιά κάθε διαγράμματος. Μεγάλος αριθμός ελασμάτων (6 και 8) αντιπροσωπεύει ψηλές πιέσεις ενώ μικρός αριθμός ελασμάτων (1 και 2) αντιπροσωπεύει χαμηλές πιέσεις. Όσο περισσότερα ελάσματα αλουμινίου τόσο μεγαλύτερη η πίεση που χρειάζεται για να προκληθεί η ρήξη τους και να αρχίσει η μέτρηση των NO.

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται ότι ο δειγματολήπτης Δ1 έχει πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης, όπως ήταν αναμενόμενο. Η μέτρηση NO άρχισε σχεδόν αμέσως μετά τη ρήξη των ελασμάτων. Αφαιρώντας τη χρονική στιγμή που γίνεται η ρήξη των ελασμάτων (δηλαδή την ακαριαία αύξηση της πίεσης) από τη χρονική στιγμή που αρχίζει η μέτρηση των NO, υπολογίζεται ο χρόνος απόκρισης.

Τα αποτελέσματα μέτρησης NO υπό διαφορετικές πιέσεις (διαφορετικό αριθμό ελασμάτων) δείχνουν ότι η διακύμανση της πίεσης επηρεάζει τον χρόνο T_{10} . Όσο πιο ψηλή η πίεση τόσο πιο γρήγορα τα αέρια ταξιδεύουν μέσα στο δειγματολήπτη, οπότε και πιο γρήγορη η μέτρηση NO.

Τα αποτελέσματα του σχήματος 5.3 δείχνουν επίσης ότι η κλίση των καμπύλων NO είναι πολύ απότομη, συνεπώς και πολύ χαμηλός χρόνος T_{10-90} , κάτι που συμβαίνει για όλες τις πιέσεις. Αυτό αποδεικνύει ότι η δειγματοληψία του Δ1 δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις διακυμάνσεις της πίεσης και οφείλεται στο σχετικά μικρό μήκος (100 mm) του δειγματολήπτη που επιτρέπει στα καυσαέρια να εισέλθουν άμεσα στο θάλαμο χημικής φωταύγειας.



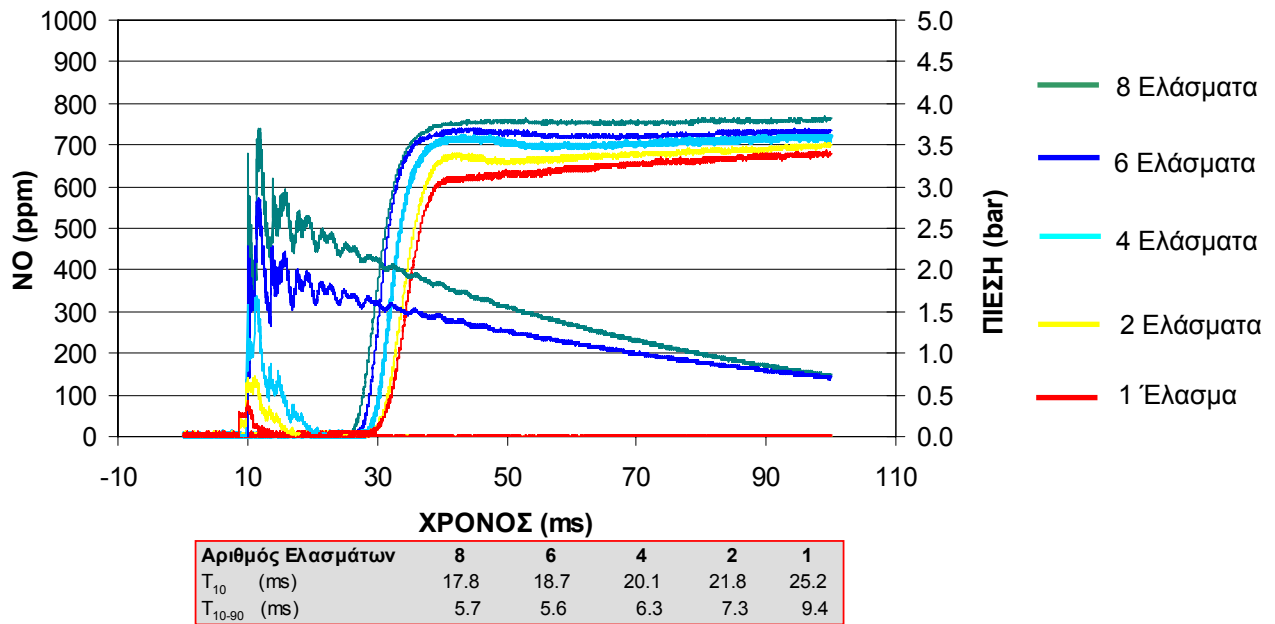
Σχήμα 5.3. Αποτελέσματα δοκιμών πρότυπου δειγματολήπτη Cambustion Δ1

Τα αποτελέσματα από τον δειγματολήπτη Δ2.1 απεικονίζονται στο σχήμα 5.4, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του οποίου αναφέρονται στον πίνακα 5.1. Οι σημαντικότερες διαφορές του Δ2.1 από τον Δ1 είναι η προέκταση από 100mm στα 600mm, το ακροφύσιο των 5mm που τοποθετήθηκε στο άκρο του δειγματολήπτη και το υλικό κατασκευής της προέκτασης του δειγματολήπτη από πυριτικό γυαλί.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο χρόνος T_{10} του συστήματος αυξήθηκε σημαντικά λόγω της επέκτασης. Αυτό φαίνεται από την χρονική διαφορά μεταξύ του σημείου που γίνεται η ρήξη των ελασμάτων και της έναρξης της μέτρησης των NO.

Επίσης, η κλίση της καμπύλης NO δεν είναι πλέον απότομη λόγω της αύξησης του χρόνου απόκρισης T_{10-90} .

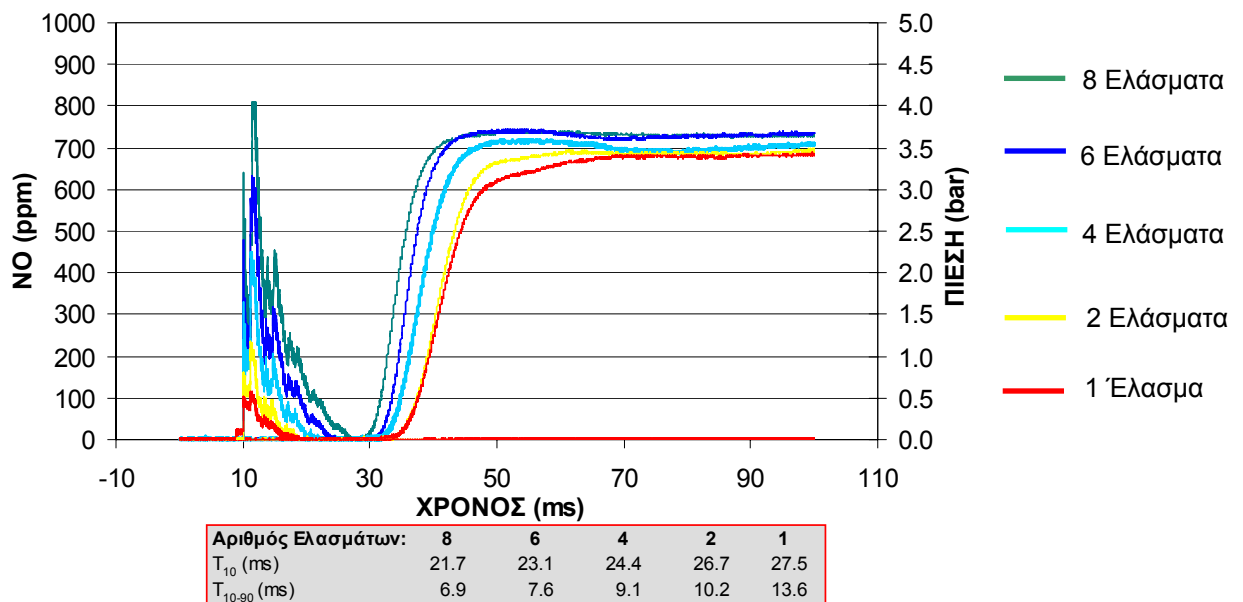
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο δειγματολήπτη αυτός δεν είναι κατάλληλος για μέτρηση των NO με ακρίβεια.



Σχήμα 5.4. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.1

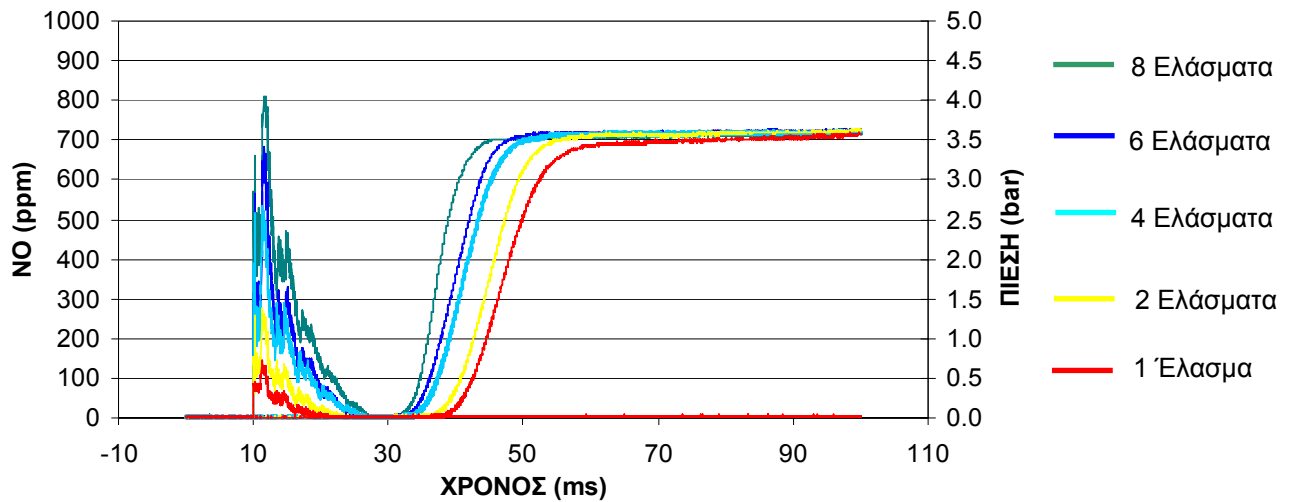
Η επόμενη δοκιμή αφορούσε τον δειγματολήπτη Δ2.2, του οποίου αυξήθηκε η εσωτερική διάμετρος του ακροφύσιου. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 5.5.

Οι καμπύλες των NO για τις διαφορετικές πιέσεις δείχνουν ότι δεν υπάρχει καμία βελτίωση στη ποιότητα της μέτρησης αλλά αντιθέτως οι χρόνοι απόκρισης έχουν αυξηθεί.



Σχήμα 5.5. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.2

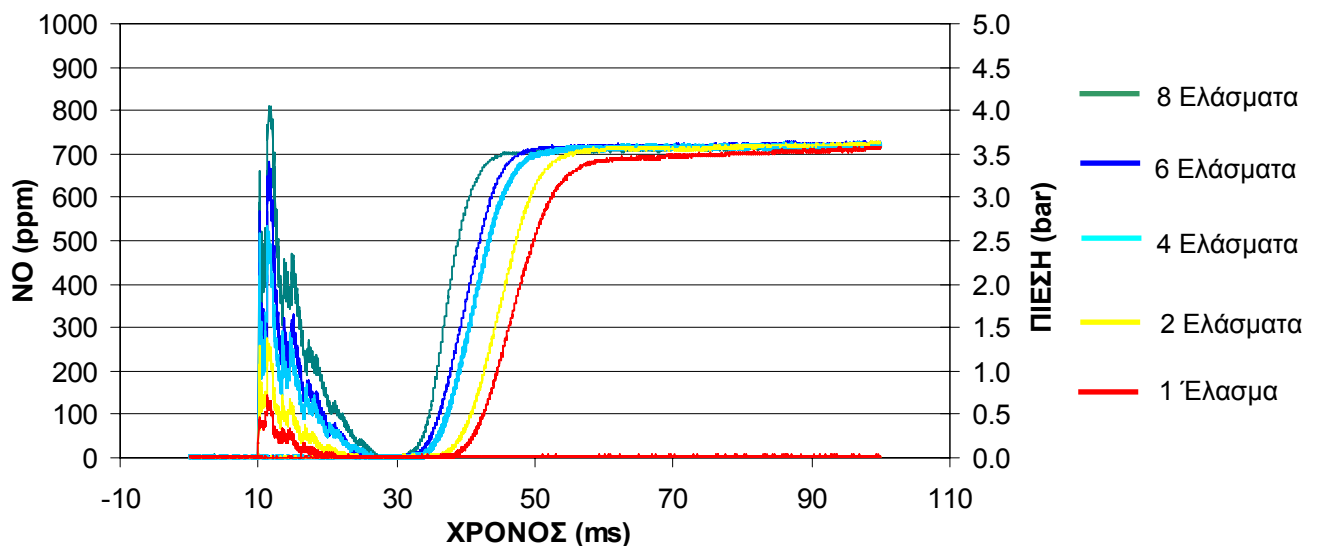
Η επόμενη μετατροπή αφορούσε στην αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου της επέκτασης. Τα αποτελέσματα του νέου δειγματολήπτη Δ2.3 (σχήμα 5.6) δείχνουν ότι οι χρόνοι απόκρισης έχουν αυξηθεί ακόμη περισσότερο με αποτέλεσμα και αυτός ο δειγματολήπτης να κριθεί ακατάλληλος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Αριθμός Ελασμάτων:	8	6	4	2	1
T_{10} (ms)	24.3	25.4	26.5	29.8	31.6
T_{10-90} (ms)	7.2	9.7	10.4	11.5	12.9

Σχήμα 5.6. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.3

Το σχήμα 5.7 απεικονίζει τα αποτελέσματα από τον δειγματολήπτη Δ2.4.



Αριθμός Ελασμάτων:	8	6	4	2	1
T_{10} (ms)	23.7	24.8	25.8	26.9	27.5
T_{10-90} (ms)	7.1	7.2	8.1	10.1	10.9

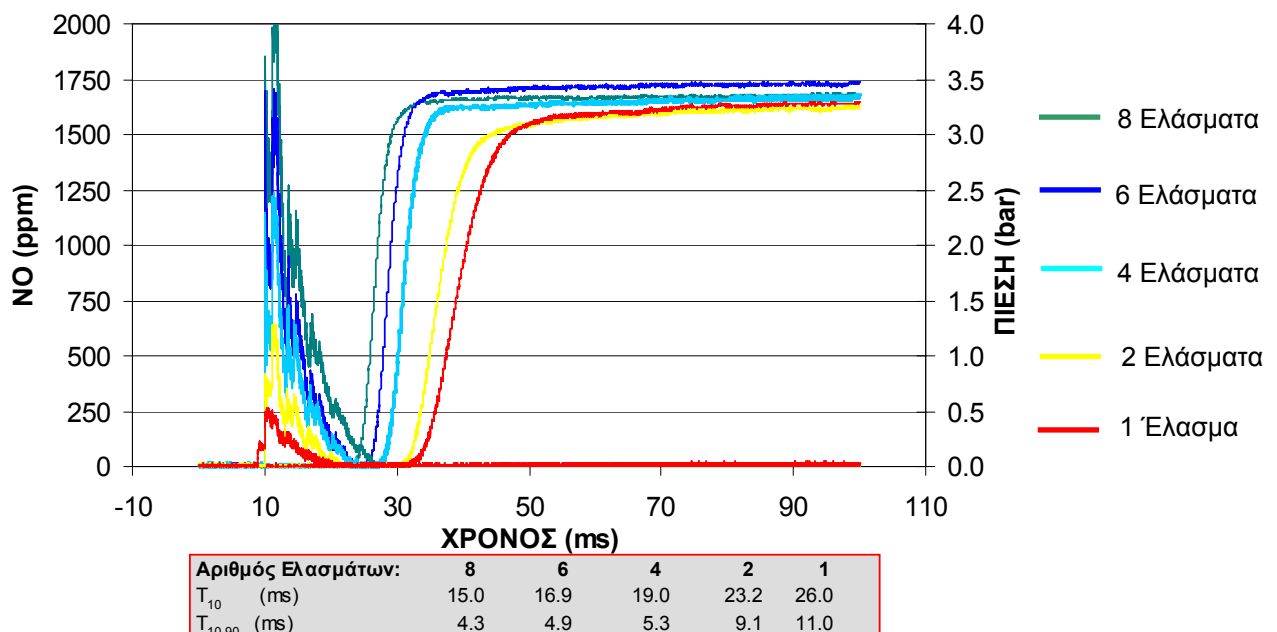
Σχήμα 5.7. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ2.4

Η κατασκευαστική διαφορά του Δ2.4 από τον προηγούμενο δειγματολήπτη είναι ότι η διάμετρος του ακροφύσιου έχει μειωθεί. Από τις καμπύλες των NO προκύπτει ότι ούτε και αυτή η αλλαγή βελτίωσε τους χρόνους απόκρισης.

Όλα τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν δείχνουν ότι ο δειγματολήπτης τύπου Δ2.Χ είναι ακατάλληλος για χρήση σε συνθήκες όπου η πίεση των αερίων καύσης μεταβάλλεται. Σε αυτή τη φάση της ανάπτυξης των κατασκευαστικών παραμέτρων του δειγματολήπτη χρειάστηκε μια δραστική αλλαγή στις σχεδιαστικές παραμέτρους ώστε να μειωθεί σημαντικά η επίδραση της διακύμανσης της πίεσης στην ακρίβεια της μέτρησης των NO. Η αλλαγή αυτή αφορούσε στη μείωση του μήκους του ακροφύσιου από 5mm σε 1mm και εξετάστηκε στους δειγματολήπτες Δ3.Χ.

Τα αποτελέσματα από τον δειγματολήπτη Δ3.1 φαίνονται στο σχήμα 5.8.

Είναι εμφανές από την απότομη κλίση των καμπύλων NO ότι το μικρότερο μήκος του ακροφύσιου βελτίωσε σημαντικά τους χρόνους απόκρισης της μέτρησης σε σχέση με αυτούς που μετρήθηκαν από τους δειγματολήπτες Δ2.Χ.

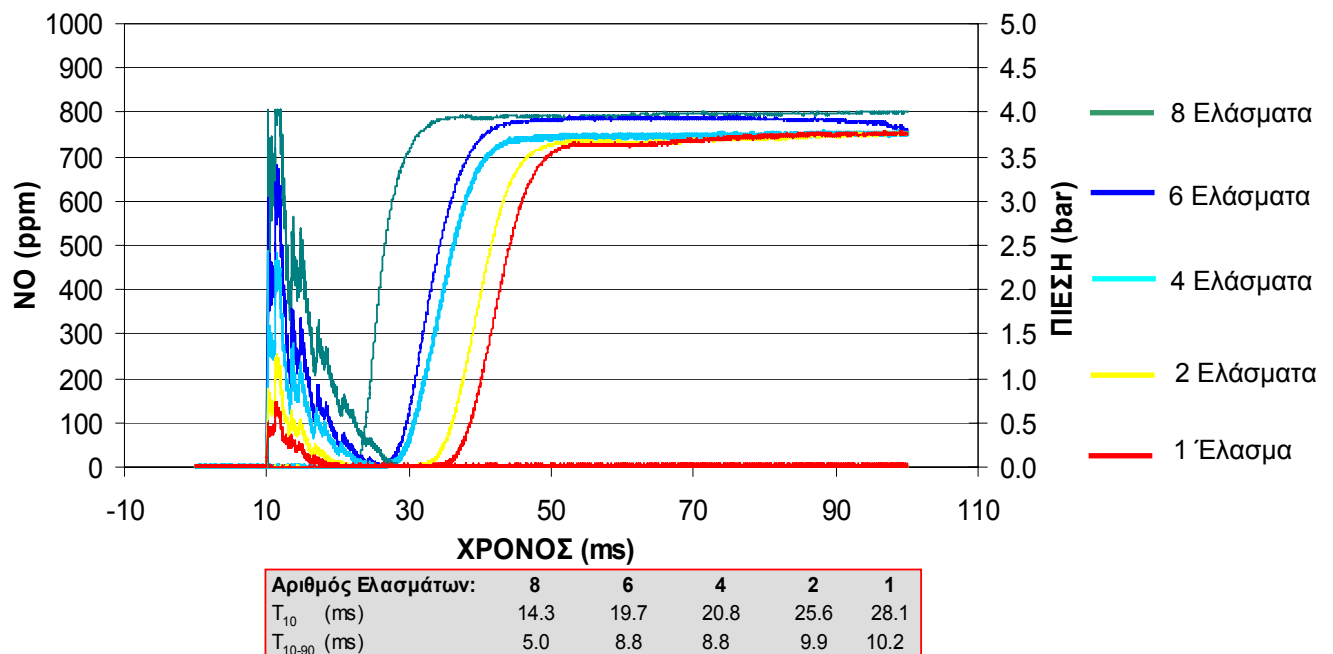


Σχήμα 5.8 Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.1

Συγκρίνοντας όμως τα αποτελέσματα NO υπό διαφορετικές πιέσεις φαίνεται ότι οι μετρήσεις NO υπό υψηλή πίεση (4, 6 και 8 ελάσματα) είναι αισθητά πιο γρήγορες από αυτές όταν η πίεση ήταν χαμηλή (1 και 2 ελάσματα). Για τις χαμηλές πιέσεις ο χρόνος απόκρισης αυξήθηκε σημαντικά.

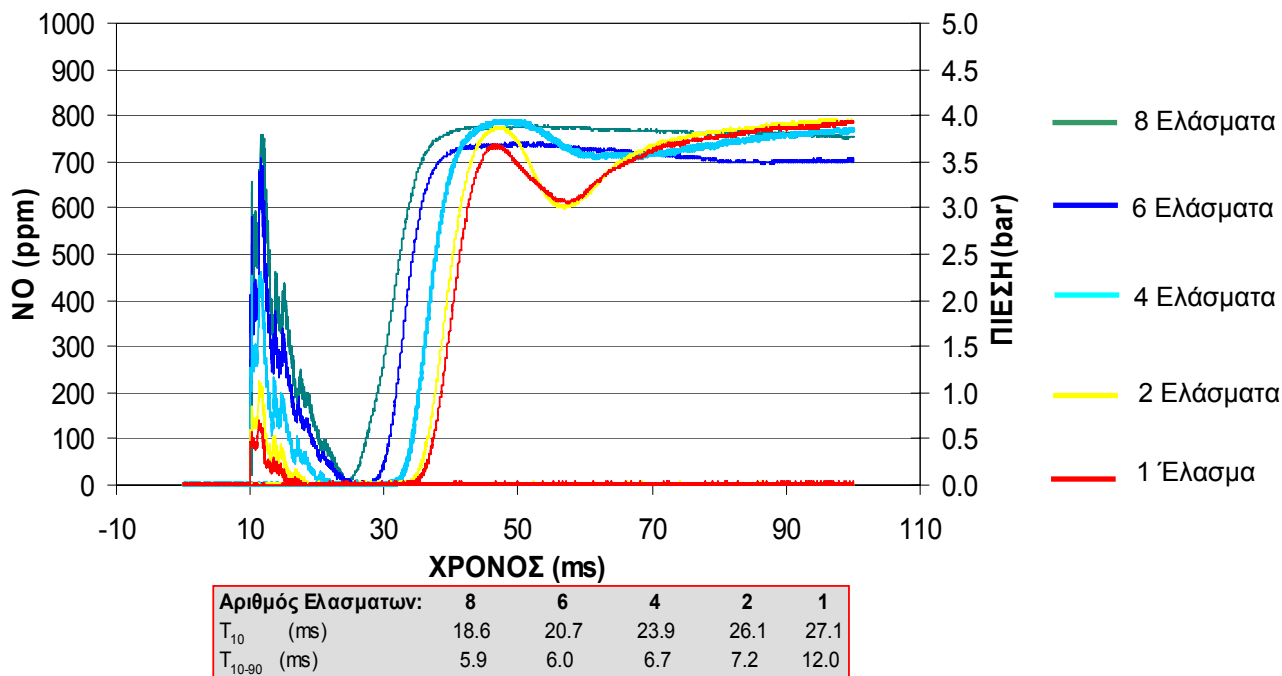
Τα πιο πάνω αποτελέσματα δείχναν ότι η αλλαγή μήκους του ακροφύσιου παρέχει δυνατότητες μέτρησης των NO με μεγάλη ακρίβεια. Το επόμενο βήμα ήταν να μειωθούν σε ένα ικανοποιητικό βαθμό οι επιπτώσεις της διακύμανσης της πίεσης στο χρόνο απόκρισης, για τις χαμηλές πιέσεις.

Η επόμενη αλλαγή αφορούσε την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του ακροφύσιου ενώ το μήκος του διατηρήθηκε στο 1mm. Τα αποτελέσματα του Δ3.2, που φαίνονται στο σχήμα 5.9, δείχνουν ότι η μέτρηση των NO έχει χειροτερεύσει. Ο χρόνος απόκρισης και η επίδραση της διακύμανση της πίεσης αυξήθηκαν σημαντικά.



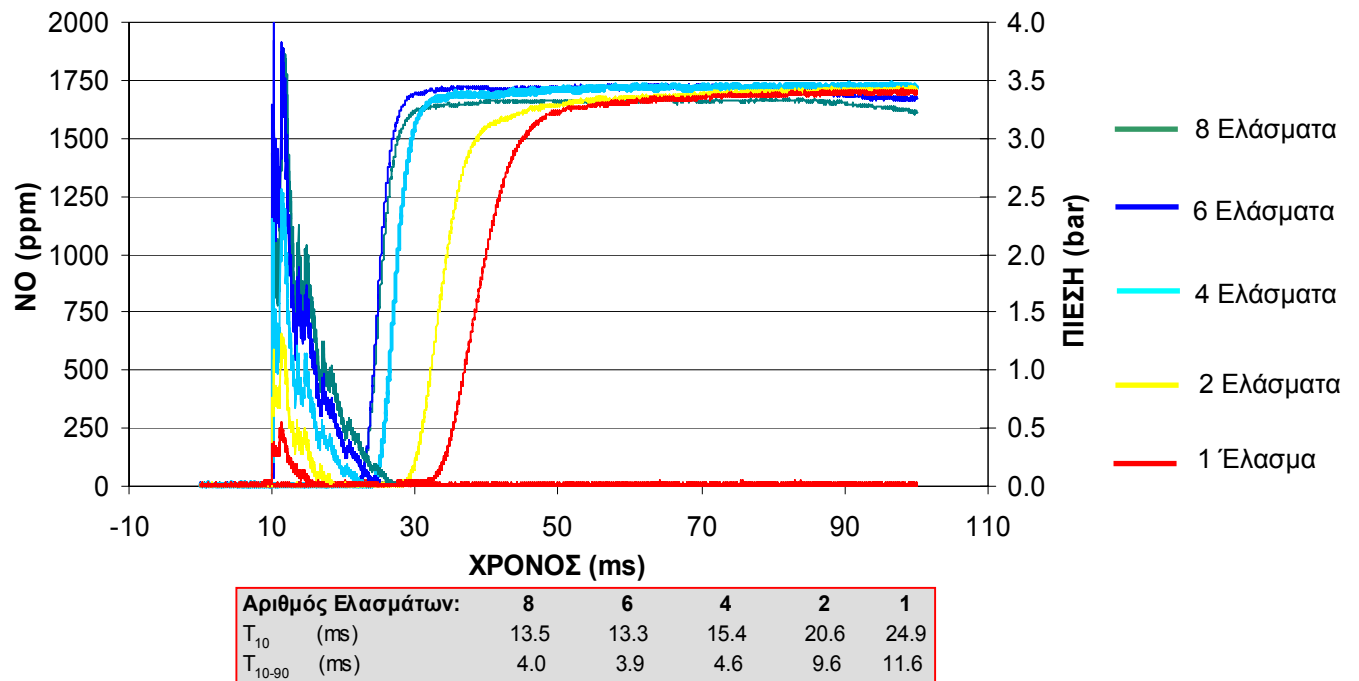
Σχήμα 5.9. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.2

Στην επόμενη δοκιμή η διάμετρος της επέκτασης του δειγματολήπτη Δ3.3 μειώθηκε και τα αποτελέσματα των πειραμάτων φαίνονται στο σχήμα 5.10. Είναι πάλι εμφανές ότι η αλλαγή αυτή δεν βελτίωσε καθόλου τις μετρήσεις των NO.



Σχήμα 5.10. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.3

Η επόμενη αλλαγή αφορούσε στην αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου της επέκτασης του δειγματολήπτη αλλά επίσης και την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του ακροφύσιου. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές του Δ3.4 φαίνονται στο σχήμα 5.11. Η κλίση των καμπύλων NO είναι πολύ απότομη λόγω των πολύ χαμηλών χρόνων απόκρισης. Η αλλαγή στη πίεση εξακολουθεί να επηρεάζει τους χρόνους απόκρισης κατά τις δοκιμές υπό χαμηλή πίεση. Συγκεκριμένα ο χρόνος που αυξήθηκε αισθητά είναι ο χρόνος T_{10} ο οποίος δεν επηρεάζει την μέτρηση της ποσότητας των NO. Τα αποτελέσματα από τον Δ3.4 κρίνονται ικανοποιητικά επειδή ο χρόνος απόκρισης T_{10-90} είναι ικανοποιητικός για όλες τις πιέσεις που εξετάστηκαν.



Σχήμα 5.11. Αποτελέσματα δοκιμών δειγματολήπτη Δ3.4

6. Πειράματα υπό κανονικές συνθήκες καύσης

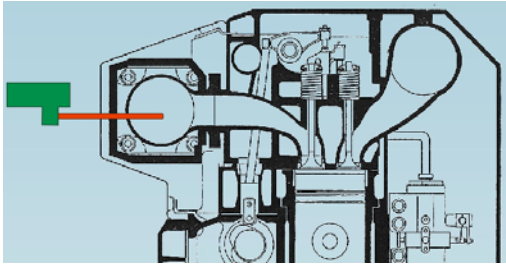
Τα αποτελέσματα από τα πειράματα στη τράπεζα δοκιμών ανέδειξαν τόσο τα μειονεκτήματα όσο και τα πλεονεκτήματα των διαφόρων δειγματοληπτών που εξετάστηκαν. Η τελική όμως αποτίμηση ενός δειγματολήπτη εξαρτάται από την απόδοση του όταν υποβληθεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Για να εξακριβωθεί εάν ο δειγματολήπτης θα μπορέσει να αποδώσει ικανοποιητικά υπό οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας (π.χ. ατμοσφαιρικής καύσης [καυστήρες] ή καύσης υπό πίεση [ΜΕΚ]) υποβλήθηκε στη χειρότερη από τις δυο περιπτώσεις. Για το σκοπό αυτό η δειγματοληψία επιλέχθηκε να γίνει στο σύστημα εξαγωγής μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, κοντά στη βαλβίδα εξαγωγής. Η μηχανή που επιλέχθηκε ήταν μια τετράχρονη πεντακύλινδρη ντίζελ. Οι δοκιμές έγιναν σε διάφορα φορτία (10%, 50% και 100%) ώστε να εξεταστεί η επίδραση της διακύμανσης της πίεσης και της θερμοκρασία των καυσαερίων στην απόδοση του δειγματολήπτη.

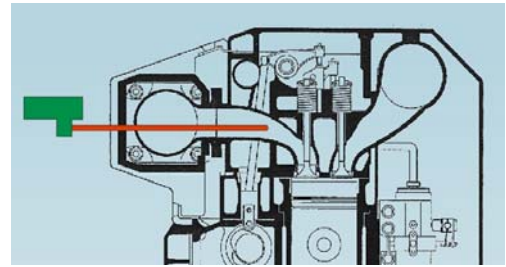
Με βάση τα αποτελέσματα από τα πειράματα στην τράπεζα δοκιμών επιλέχθηκαν τρεις δειγματολήπτες (Δ2.1, Δ3.3 και Δ3.4) για τις μετρήσεις των ΝΟ σε αέρια καύσης. Εκτός από τους τρεις δειγματολήπτες υπό εξέταση, μετρήσεις ΝΟ διεξάχθηκαν και με τον πρότυπο δειγματολήπτη της Combustion (Δ1) για λόγους σύγκρισης.

Όταν ο δειγματολήπτης Δ1 μήκους 100mm τοποθετήθηκε στο σύστημα εξαγωγής το άκρο του βρισκόταν σε απόσταση περίπου 450 - 500mm από την βαλβίδα εξαγωγής (σχήμα 6.1α). Αντιθέτως, όταν ο δειγματολήπτης με επέκταση τοποθετήθηκε στο σύστημα εξαγωγής, το άκρο του βρισκόταν σε απόσταση περίπου 10mm πίσω από τη βαλβίδα εξαγωγής (σχήμα 6.1β).

Σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα ο οριζόντιος άξονας δίνει τη γωνία του στροφαλοφόρου άξονα, όπου στις μηδέν μοίρες βρίσκεται το άνω νεκρό σημείο της συμπίεσης. Ο κατακόρυφος άξονας δίνει τη μέτρηση των ΝΟ. Στα διαγράμματα φαίνονται επίσης και οι χρονικές στιγμές που ανοίγει (ΑΒΕ: -290° [με κόκκινο]) και κλείνει (ΚΒΕ: -40° [με μπλε]) η βαλβίδα εξαγωγής. Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα είναι η μέση τιμή των αποτελεσμάτων για 50 κύκλους μετρήσεων.

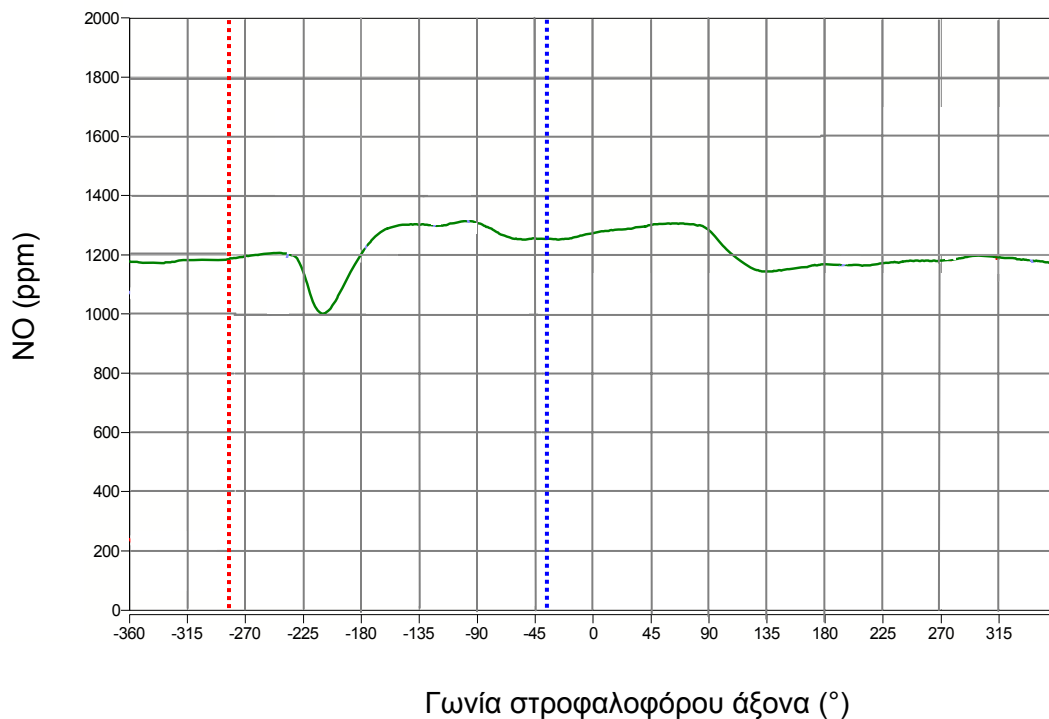


Σχήμα 6.1α. Ο Δ1 στο σύστημα εξαγωγής, **απέναντι** από την βαλβίδα εξαγωγής του κυλίνδρου 1



Σχήμα 6.1β. Οι Δ2.X και Δ3.X στο σύστημα εξαγωγής, **πίσω** από την βαλβίδα του κυλίνδρου 1

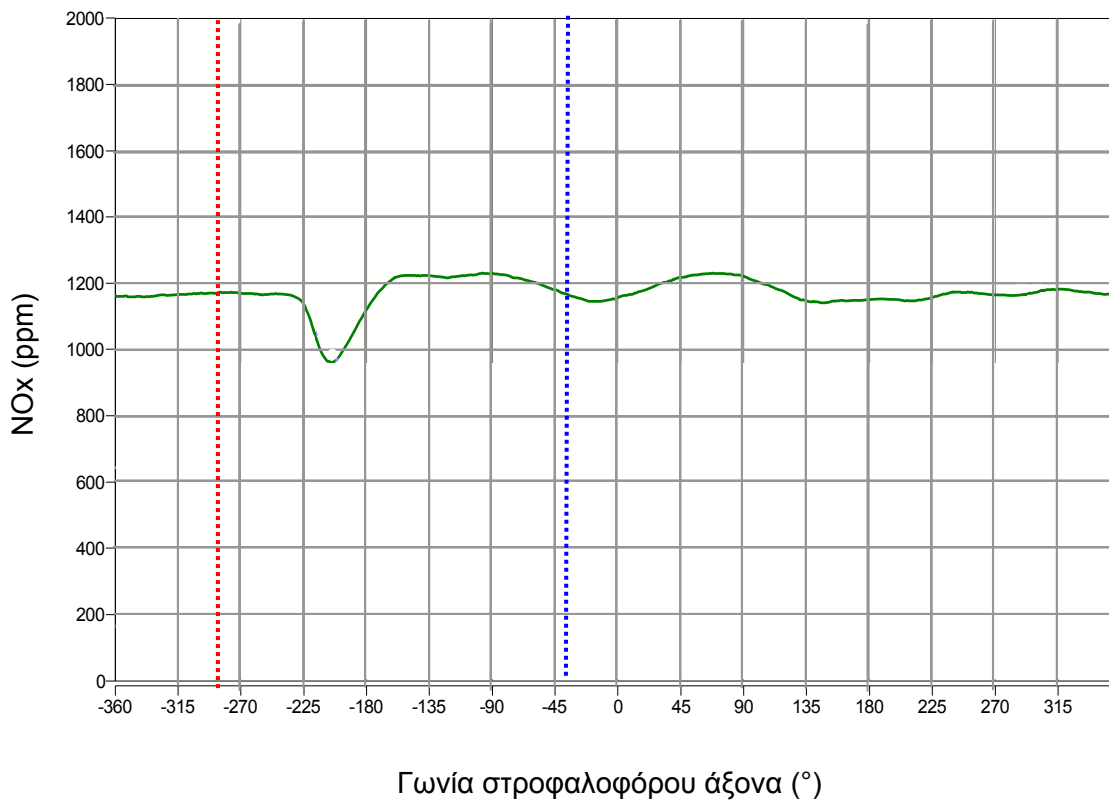
Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές με τον δειγματολήπτη Δ1 φαίνονται στα σχήματα 6.2α, β και γ, για τα φορτία 100%, 50% και 10%, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές στο 100% φορτίο (σχήμα 6.2α) δείχνουν ότι λίγο μετά από το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής (ΑΒΕ) τα NO αυξάνονται αισθητά, από 1200ppm μέχρι 1300ppm. Η τιμή αυτή μειώνεται και πάλι στα 1200 ppm κάποια στιγμή μετά το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής (ΚΒΕ). Ο δειγματολήπτης μετράει συνεχώς NO, γύρω στα 1200 ppm, κατά την χρονική διάρκεια που οι βαλβίδες του κυλίνδρου 1 είναι κλειστές. Αυτό συμβαίνει επειδή εκείνη τη χρονική περίοδο εισέρχονται στον Δ1 καυσαέρια από τους άλλους κυλίνδρους.



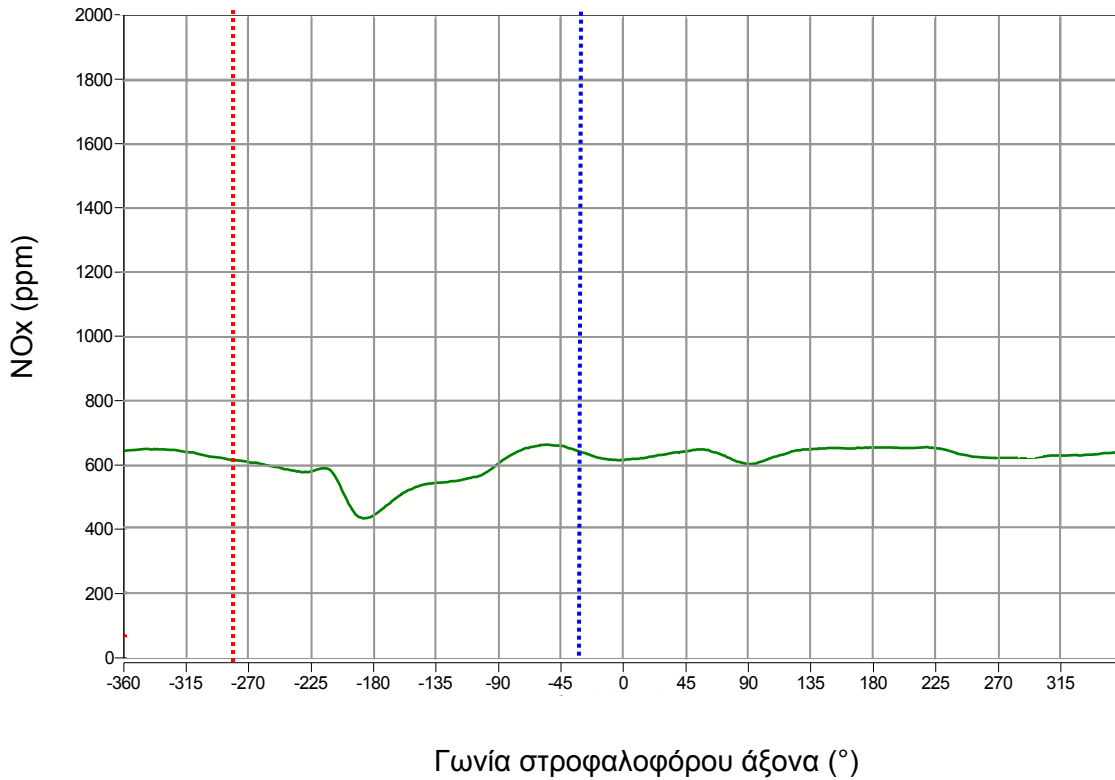
Σχήμα 6.2α. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 100%

Όταν το φορτίο μειώθηκε στο 50% μειώθηκε και η μέση τιμή των εκπομπών NO όπως ήταν αναμενόμενο. Η καμπύλη των NO που μετρήθηκαν από τον δειγματολήπτη είναι παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε για το 100% φορτίο, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα στο σχήμα 6.2β.

Στη δοκιμή με το φορτίο στο 10% (σχήμα 6.2γ) τα NO έχουν μειωθεί σημαντικά. Επίσης, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης των καυσαερίων η μέτρηση (δηλαδή αύξηση των NO) αρχίζει πολύ πιο μετά από το ABE, από ότι στα φορτία 100% και 50%. Αυτό είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της χαμηλής πίεσης στο χρόνο απόκρισης του δειγματολήπτη.



Σχήμα 6.2β. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 50%

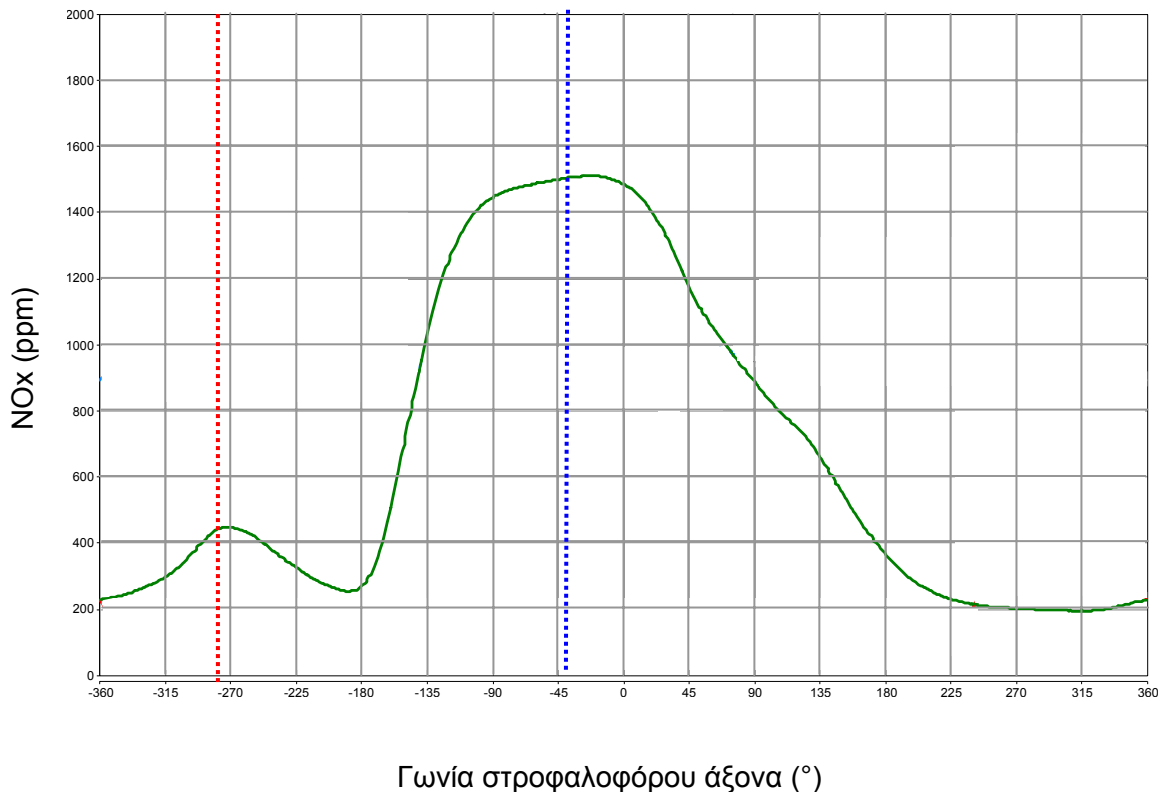


Σχήμα 6.2γ. Μέτρηση NO από τον Δ1, σε φορτίο 10%

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές με τον δειγματολήπτη Δ2.1 φαίνονται στα σχήματα 6.3α, β και γ, για τα φορτία 100%, 50% και 10%, αντίστοιχα. Λόγω του μήκους του Δ2.1 (600mm) το σημείο δειγματοληψίας είναι πίσω ακριβώς από την βαλβίδα εξαγωγής όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1β.

Οι μετρήσεις NO για το 100% φορτίο (σχήμα 6.3α) δείχνουν ότι λίγο μετά από το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής (ABE) τα NO αυξάνονται απότομα από την πολύ χαμηλή τιμή των 200 ppm, στα 1500 ppm. Η τιμή αυτή μειώνεται και πάλι στα 200 ppm κάποια στιγμή μετά το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής (KBE). Είναι εμφανές ότι η καμπύλη των NO με τον δειγματολήπτη Δ2.1 είναι πολύ διαφορετική από αυτή που καταγράφηκε από τον Δ1. Επειδή το άκρο του Δ2.1 (σημείο δειγματοληψίας) τοποθετήθηκε πίσω από την βαλβίδα εξαγωγής, ο δειγματολήπτης αυτός μέτρησε τα NO μόνο από τον κύλινδρο 1, κάτι που εξηγεί επίσης και τη χαμηλή τιμή των NO πριν από το ABE. Η μέτρηση των NO από τον κύλινδρο 1 άρχισε μόνο όταν άνοιξε η βαλβίδα εξαγωγής.

Παρόλο που η μέτρηση από τον Δ2.1. αντιπροσωπεύει τα NO που εξέρχονται από τον κύλινδρο 1 μόνο, είναι εμφανές ότι η κλίση της καμπύλης NO δεν είναι τόσο απότομη. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύει τα αποτελέσματα από την τράπεζα δοκίμων για τον συγκεκριμένο δειγματολήπτη (σχήμα 5.4). Η κλίση της καμπύλης φανερώνει τον ψηλό χρόνο απόκρισης του Δ2.1 που έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζει την ποσότητα των NO που μετρούνται.

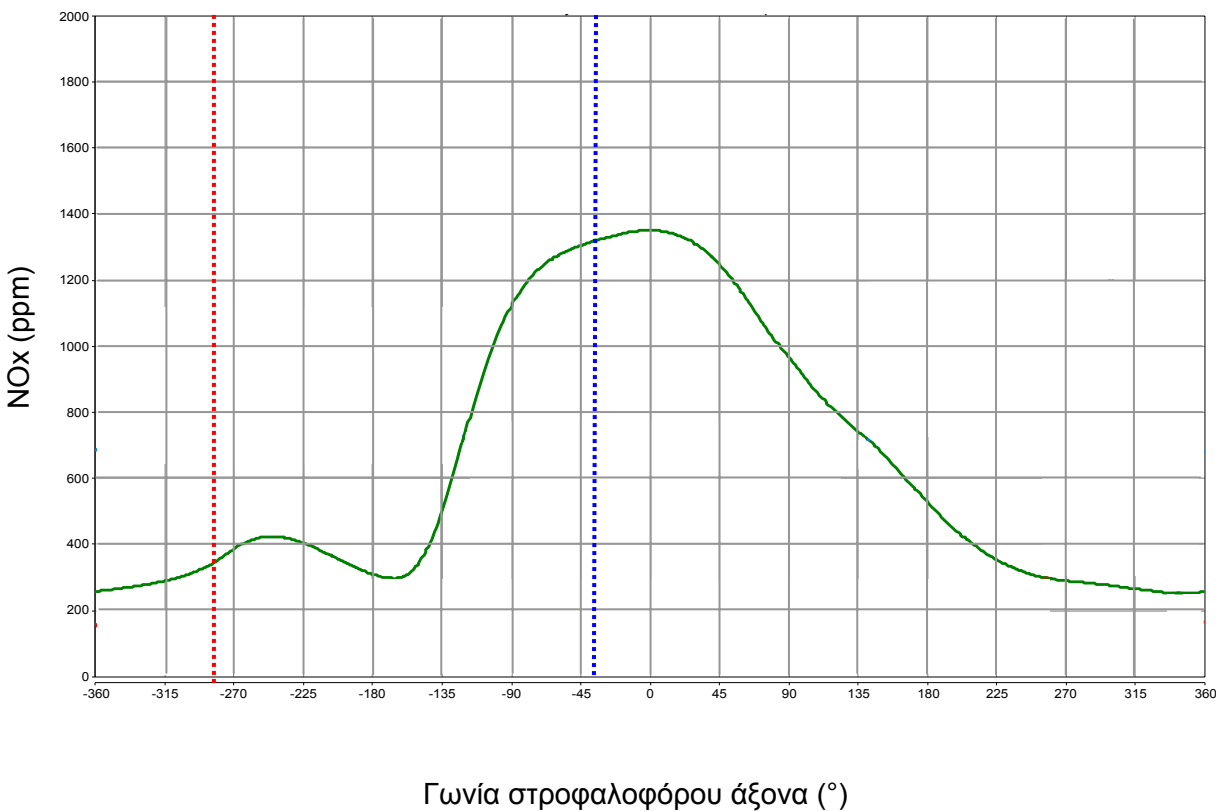


Σχήμα 6.3α. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 100%

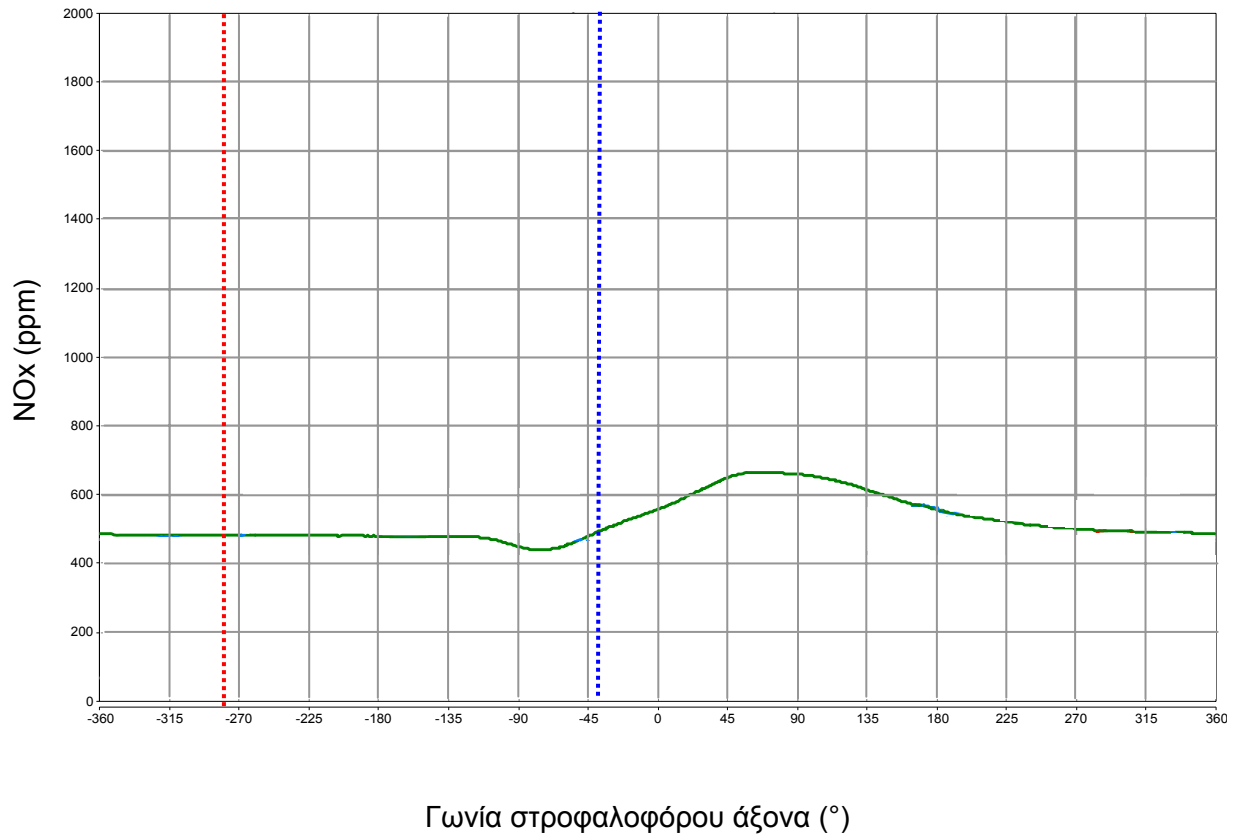
Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή στο 50% φορτίο αναφέρονται στο σχήμα 6.3β. Η καμπύλη των NO έχει παρόμοια μορφή (κλίση) με αυτή στο 100% φορτίο. Η μέγιστη τιμή των NO, όπως ήταν αναμενόμενο, μειώθηκε λόγω του χαμηλότερου φορτίου, όπως και η πτώση στη πίεση των καυσαερίων που είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο χρόνος απόκρισης του Δ2.1.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε στα αποτελέσματα από το φορτίο των 10% (σχήμα 6.3γ). Λόγω της πολύ χαμηλής πίεσης των καυσαερίων ο χρόνος απόκρισης αυξήθηκε σημαντικά.

Τα αποτελέσματα του Δ2.1 δείχνουν ότι ο χρόνος απόκρισης του δειγματολήπτη δεν είναι ικανοποιητικός επειδή επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή της πίεσης των καυσαερίων.



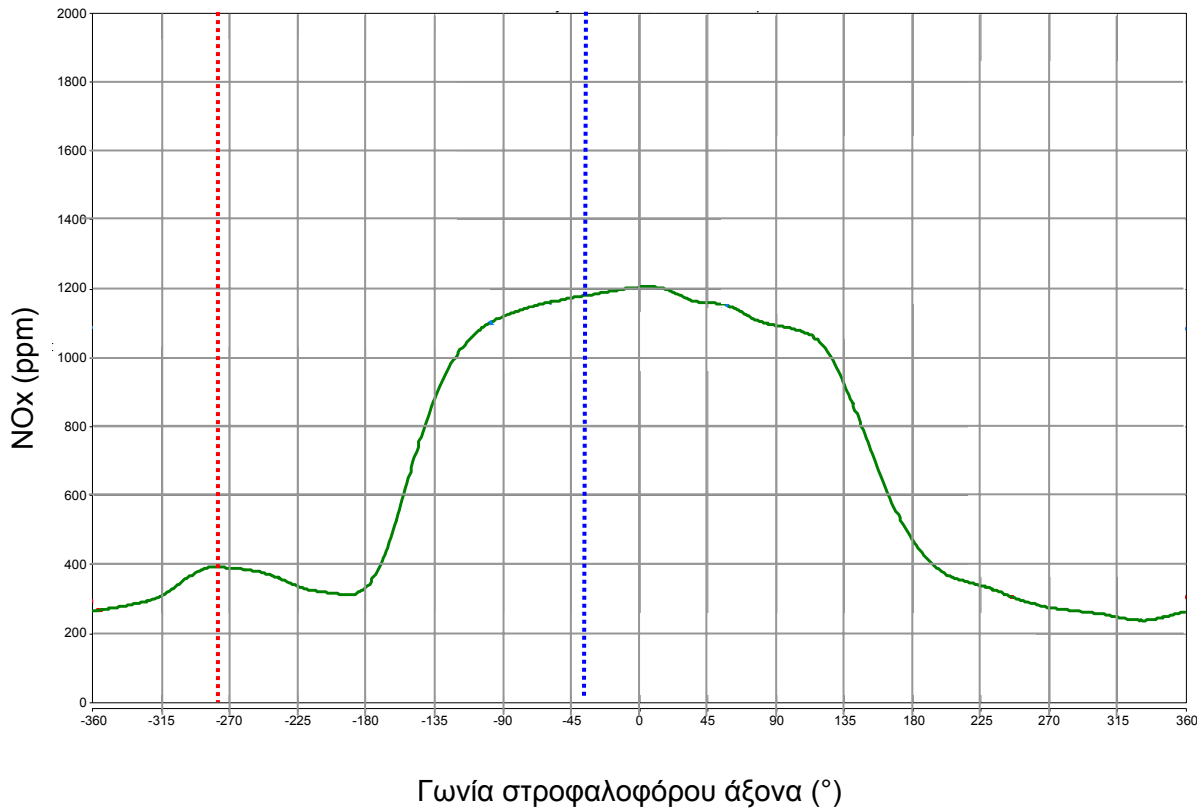
Σχήμα 6.3β. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 50%



Σχήμα 6.3γ. Μέτρηση NO από τον Δ2.1, σε φορτίο 10%

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές με τον δειγματολήπτη Δ3.3 απεικονίζονται στο σχήμα 6.4α, για το 100% φορτίο. Η καμπύλη των NO δείχνει ότι ο Δ3.3, όπως και ο Δ2.1, μετράει τα NO που εξέρχονται από τον κύλινδρο 1, λόγω του σημείου δειγματοληψίας που βρίσκεται πίσω από την βαλβίδα εξαγωγής.

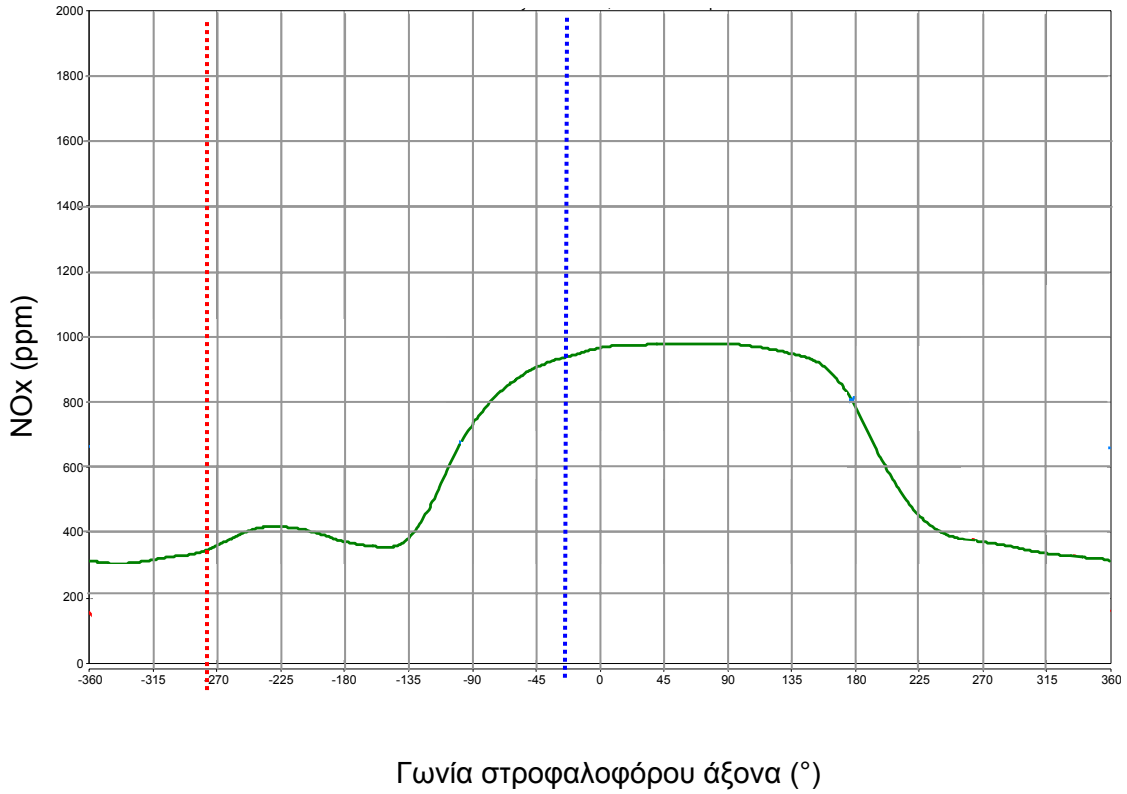
Όταν ανοίξει η βαλβίδα εξαγωγής τα NO αυξάνονται 'απότομα'. Ο χρόνος απόκρισης του Δ3.3, σε σχέση με αυτόν του Δ2.1 έχει βελτιωθεί σημαντικά και αυτό φαίνεται από την σχετικά πιο απότομη κλίση της καμπύλης των NO.



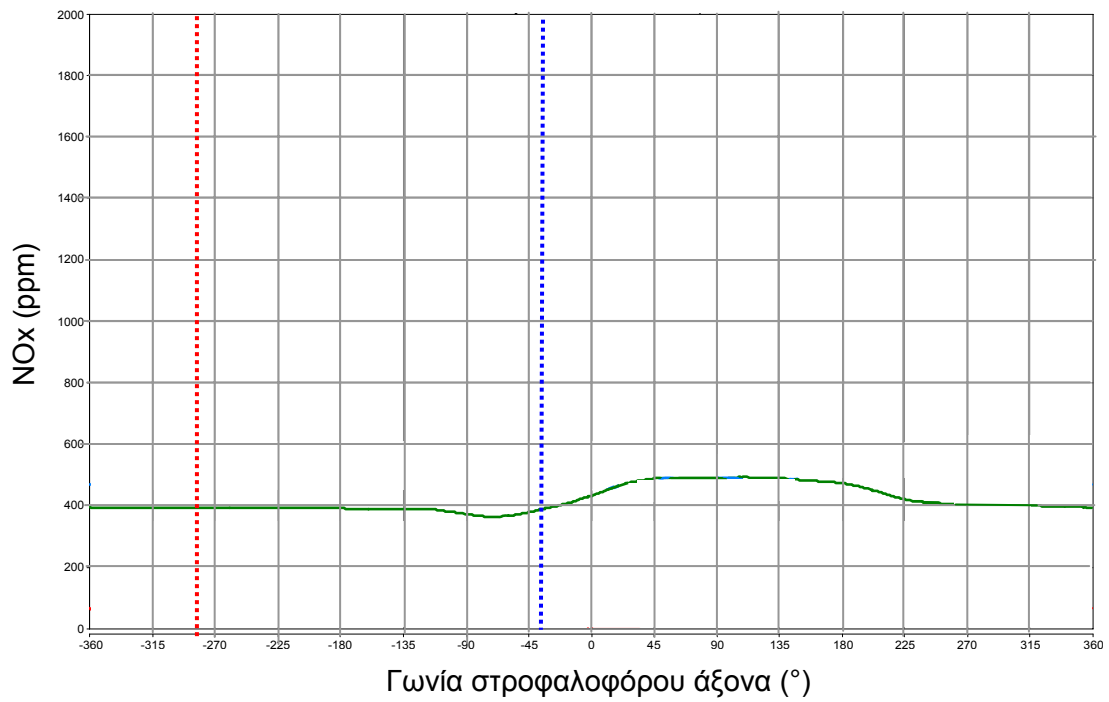
Σχήμα 6.4α. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 100%

Οι μετρήσεις των NO για τα φορτία των 50% και 10% παρουσιάζονται στα σχήματα 6.4β και γ, αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή των NO μειώνεται ανάλογα με το φορτίο.

Η κλίση της καμπύλης των NO δείχνει ότι ο χρόνος απόκρισης είναι σχετικά μεγάλος και συνεπώς επηρεάζει την ποσότητα των NO που μετριοούνται. Το φορτίο, που επηρεάζει την πίεση των καυσαερίων, συνεχίζει να επηρεάζει τον χρόνο απόκρισης του δειγματολήπτη. Συνεπώς η απόδοση του Δ3.3 κρίνεται ακατάλληλη για περαιτέρω χρήση του.

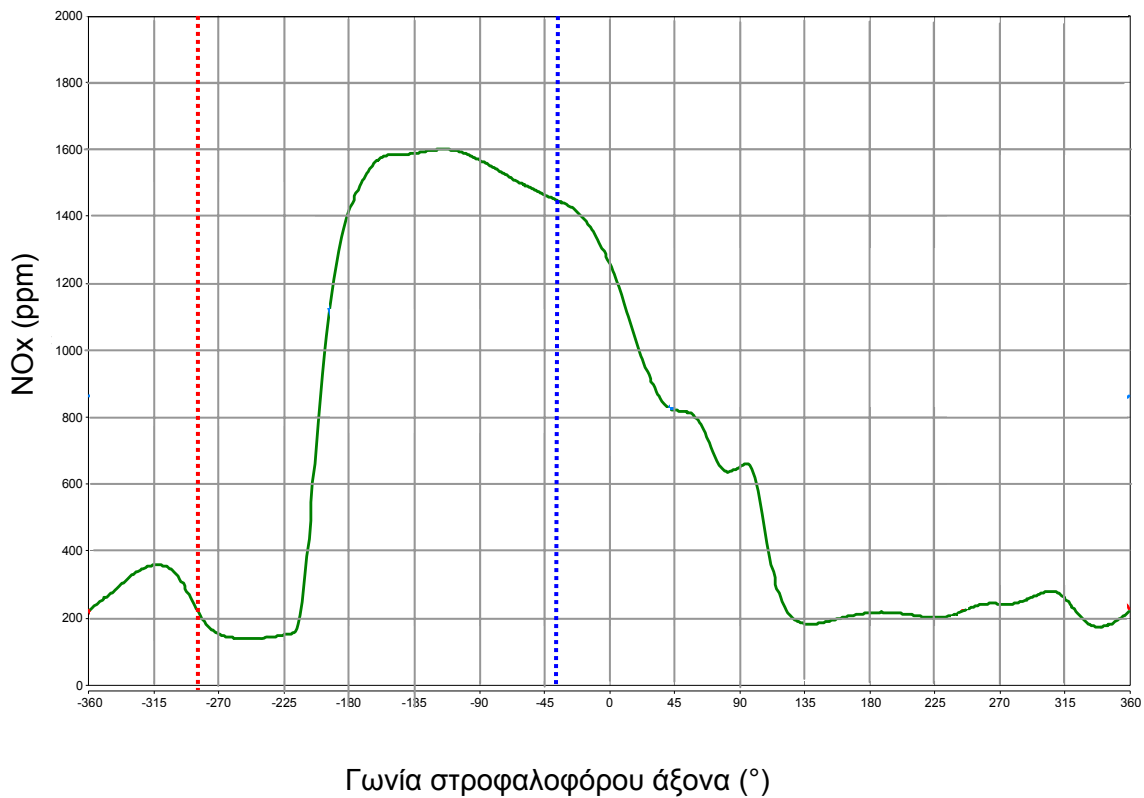


Σχήμα 6.4β. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 50%



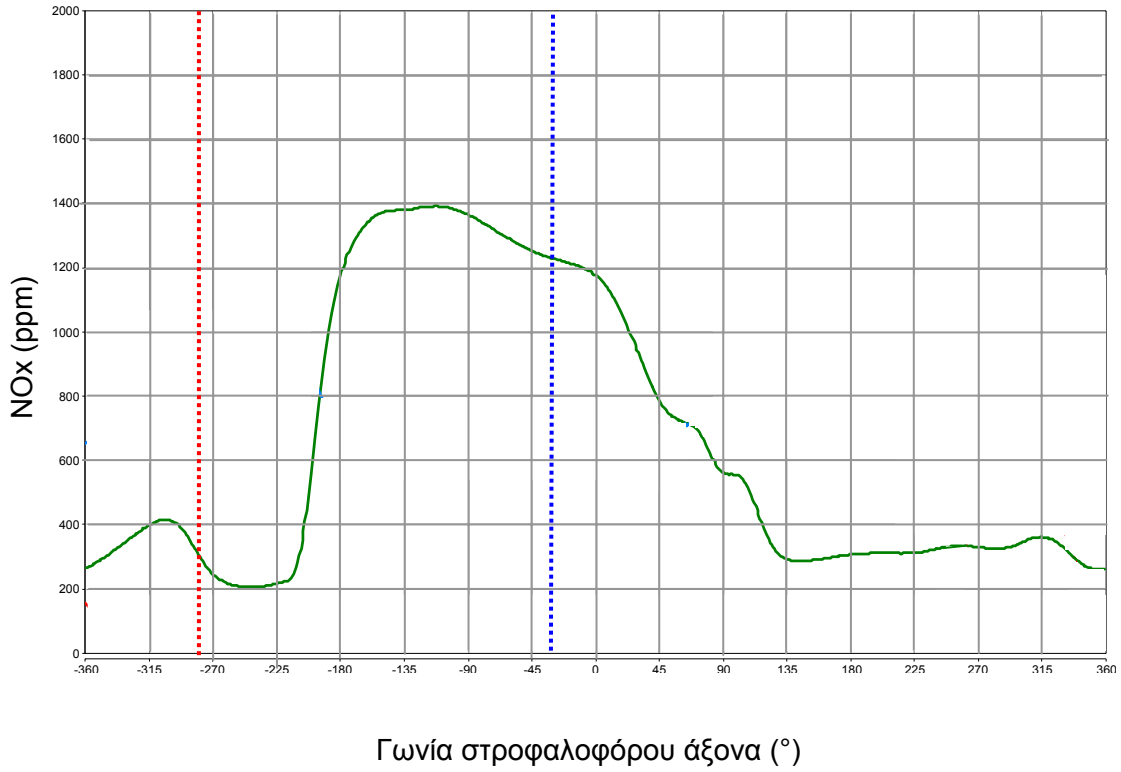
Σχήμα 6.4γ. Μέτρηση NO από τον Δ3.3, σε φορτίο 10%

Οι καμπύλες μέτρησης των NO από τον δειγματολήπτη Δ3.4 παρουσιάζονται στο σχήμα 6.5α για το 100% φορτίο. Από τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται αμέσως, σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα, η ακαριαία αύξηση των NO, λίγο μετά το ABE. Η πολύ απότομη κλίση της καμπύλης NO φανερώνει τον πολύ μικρό χρόνο απόκρισης του Δ3.4 και συνεπώς την ακρίβεια της μέτρησης της ποσότητας των NO. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με συμπεράσματα των πειραμάτων στη τράπεζα δοκιμών του Δ3.4 (σχήμα 5.11), που όπως προαναφέρθηκε ανέδειξαν τον δειγματολήπτη Δ3.4 ως τον καλύτερο.

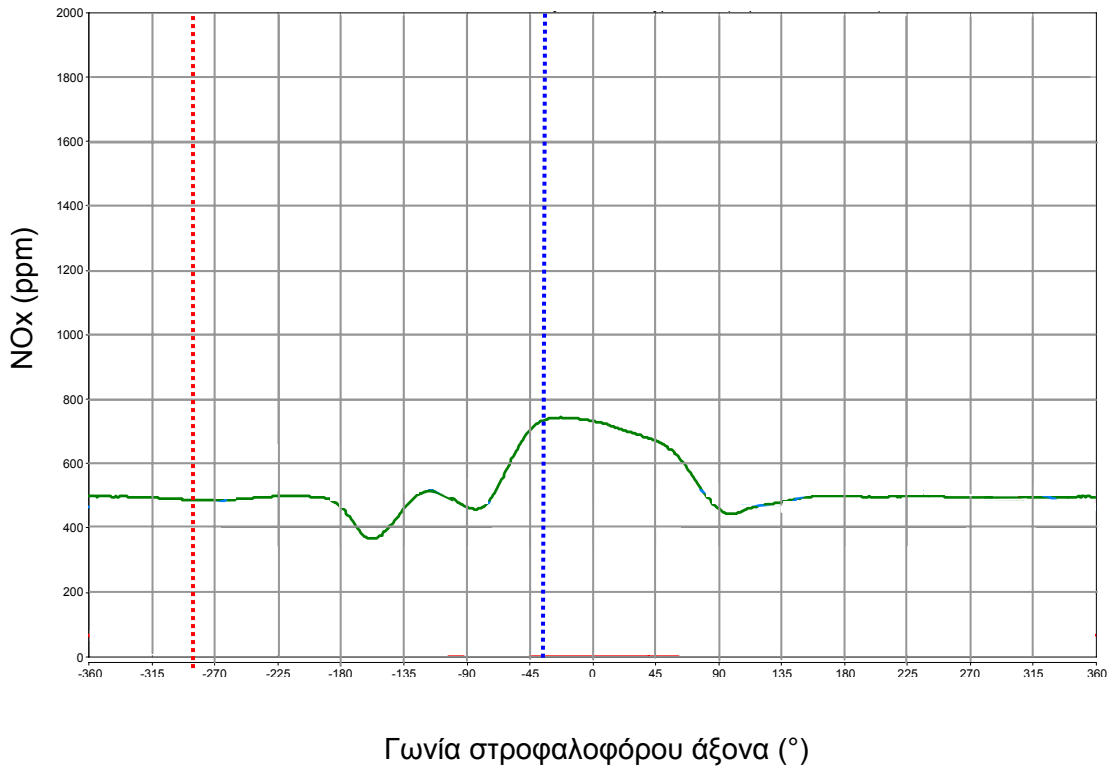


Σχήμα 6.5α. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 100%

Οι δοκιμές με τον Δ3.4 στα φορτία 50% και 10% φαίνονται στα σχήματα 6.5β και 6.5γ, αντίστοιχα. Η επαναληψιμότητα της πολύ απότομη κλίση της καμπύλης NO και σε αυτά τα φορτία αποδεικνύει ότι ο χρόνος απόκρισης του Δ3.4 δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις διακυμάνσεις της πίεσης στο σύστημα εξαγωγής. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά η απόδοση του Δ3.4 πληρεί όλες τις προϋποθέσεις (ταχεία και ακριβή δειγματοληψία, μη επηρεαζόμενη από διακυμάνσεις πίεσης) για τις προτεινόμενες εφαρμογές του.



Σχήμα 6.5β. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 50%



Σχήμα 6.5γ. Μέτρηση NO από τον Δ3.4, σε φορτίο 10%

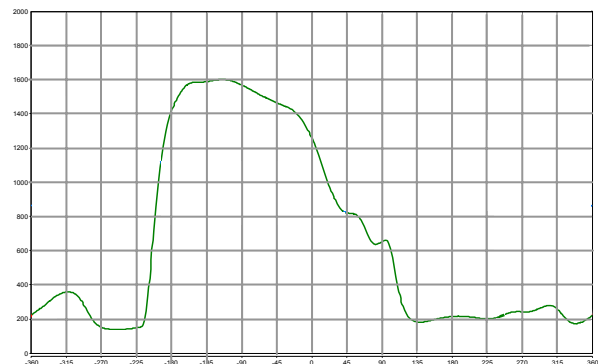
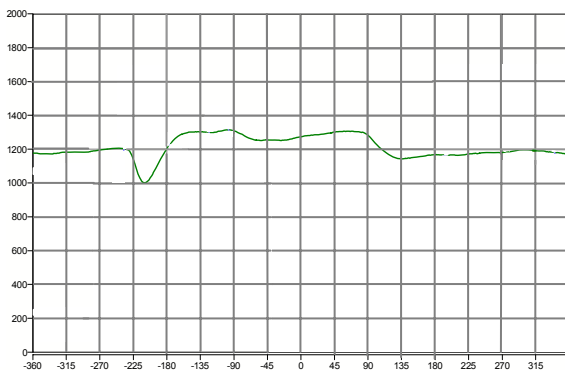
Συμπεράσματα

Η ανάλυση και πειραματική διερεύνηση για την δημιουργία ενός δειγματολήπτη με ευρύ πεδίο εφαρμογών ολοκληρώθηκε επιτυχώς με την κατασκευή ενός δειγματολήπτη μήκους 600mm για μέτρηση οξειδίων του αζώτου με πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης και μεγάλη ακρίβεια. Η ανάπτυξη του δειγματολήπτη έγινε σε τρία στάδια.

Στο πρώτο στάδιο έγινε μια θερμοδυναμική ανάλυση και εκτίμηση των αρχικών σχεδιαστικών παραμέτρων του δειγματολήπτη. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκαν παράμετροι (πίεση, θερμοκρασία, παροχή, κ.α.) που αφορούν στις συνθήκες των αερίων που αναμένονται στις διάφορες εφαρμογές του δειγματολήπτη.

Στο δεύτερο στάδιο της ανάπτυξης ο δειγματολήπτης κατασκευάστηκε με βάση τις διαστάσεις που προέκυψαν από την ανάλυση του πρώτου σταδίου. Για να βελτιωθούν περαιτέρω οι σχεδιαστικοί παράμετροι του δειγματολήπτη έγιναν πειράματα σε μια τράπεζα δοκιμών που κατασκευάστηκε γι' αυτό τον σκοπό. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων στην τράπεζα δοκιμών, κατέστη δυνατή η περαιτέρω βελτίωση των κύριων σχεδιαστικών παραμέτρων του δειγματολήπτη.

Στο τρίτο και τελικό στάδιο της ανάπτυξης, ο δειγματολήπτης χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση οξειδίων του αζώτου σε πραγματικά αέρια καύσης. Τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με αυτά της τράπεζας δοκιμών και καθόρισαν τον τελικό σχεδιασμό του δειγματολήπτη για μετρήσεις NOx ταχείας δειγματοληψίας και υψηλής ακρίβειας. Τα επόμενα δυο διαγράμματα απεικονίζουν τις μετρήσεις NOx από τον αρχικό δειγματολήπτη της Combustion (Δ1) και από τον τελικό δειγματολήπτη (Δ3.4) που αναπτύχθηκε, κάτω από τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.



Η εξέλιξη του δειγματολήπτη: Σύγκριση αποτελεσμάτων του Δ1 (αριστερά) και του Δ3.4

Είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα του Δ3.4 χαρακτηρίζουν με πολύ μεγάλη ακρίβεια την συμπεριφορά των οξειδίων του αζώτου στο σημείο που γίνεται η μέτρηση. Οι πληροφορίες που προσφέρει μια τέτοια ανάλυση της διακύμανσης των NOx μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τη βελτίωση μιας τεχνολογίας ή λειτουργίας μηχανήματος με απώτερο σκοπό τη μείωση των οξειδίων του αζώτου.

Περαιτέρω βελτίωση του δειγματολήπτη είναι εφικτή και αυτό μπορεί να αποτελέσει συνέχεια της εργασίας αυτής. Η περαιτέρω βελτίωση μπορεί να συμπεριλάβει την χρήση του δειγματολήπτη σε μετρήσεις NOx για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά, αντοχή και αξιοπιστία του. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι ζωής των υλικών του δειγματολήπτη (πχ. για το πυριτικό γυαλί) κάτω από δυσμενής συνθήκες λειτουργίας και επίσης οι χρόνοι που καθιστούν αναγκαία την συντήρηση του δειγματολήπτη, λόγω μεγάλης εναπόθεσης σωματιδίων στον αγωγό.

Κάτι τέτοιο ενδέχεται να οδηγήσει σε περαιτέρω εξέλιξη του δειγματολήπτη με απώτερο σκοπό τη δημιουργία ενός αξιόπιστου συστήματος ταχείας μέτρησης οξειδίων του αζώτου για διάφορες εφαρμογές καύσεως.

Ευχαριστίες

Το πειραματικό σκέλος της παρούσας εργασίας έγινε στο Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Ο υπογράφων ευχαριστεί τον Διευθυντή του εργαστηρίου Καθηγητή Νικόλαο Κυρτάτο για την παραχώρηση των οργάνων, διατάξεων μετρήσεων και της πειραματικής κλίνης δοκίμων για την εκτέλεση των πειραμάτων. Επίσης, ευχαριστεί τον επιστημονικό συνεργάτη Dr. Ernst Ulrich και το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας για την βοήθειά του στην ανάπτυξη της τράπεζας δοκιμών δειγματολήπτη και τις οδηγίες χρήσεως των οργάνων.

Ο υπογράφων ευχαριστεί τον Dr. Mark Peckham και την εταιρεία κατασκευής των συστημάτων μέτρησης NO_x, Cambustion Ltd (Cambridge, UK), για τις πληροφορίες και λεπτομέρειες λειτουργίας του οργάνου ταχείας μέτρησης NO_x.

Βιβλιογραφία

- [1] Elsom D. Atmospheric Pollution. Blackwell, London, 1989.
- [2] Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Sofia, 1998).
United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) Environment and Human Settlements Division. Protocol concerning the Control of Emissions of Nitrogen Oxides (<http://www.unece.org/env/lrtap/nitr>)
- [3] Schwartz SE. Acid deposition: unraveling a regional phenomenon. Science. 1989, 243: 753-758; Schindler D. From acid rain to toxic snow. Ambio, 1999, 28: 350-355.
- [4] Παράρτημα σημειώσεων του Μαθήματος 'Αντιρρυπαντική τεχνολογία θερμικών Εγκαταστάσεων', Σχολή Μηχανολογών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2007.
- [5] Sunyoup Lee, "Development of mesoscale burner arrays for Gas Turbine Reheat", PhD Thesis, Mechanical Engineering Department, Stanford University, 2006.
- [6] Wilson.L.E and Miller. J.H, "Development of a pulsed sampling probe for time-resolved measurements in flickering flames", Department of Chemistry, The George Washington University, Measurement Science and Technology. 12 (2001) 1701–1708 Institute of Physics Publishing, 2001.
- [7] Dake R A "Modeling and Control of Cold Start Hydrocarbon Emissions" MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, 2005
- [8] Sukhatme, S. P., "A textbook on heat transfer", Orient Longman Publishing House, 1979.
- [9] Laing, P., "A simplified approach to modeling exhaust system emissions", SAE Technical Paper, 1999-01-3476, 1999.

[10]. Xillo.O.C., "A Sampling Probe for Fluctuating Concentration Measurements in Supersonic Flow", Master Thesis, Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.

[11]. Brixey, A.L., Paik, Y.S., Evans, E.D., and Vincent, H.J. "New experimental methods for the development and evaluation of aerosol samplers", Department of Environmental Health Sciences, University of Michigan, The Royal Society of Chemistry, 4, 633–641, 2002.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΝΑΛΥΤΩΝ

f NO_x400 Fast Response CLD

1. Introduction

These instructions are intended as a simple guide for users intending to perform basic fast response NO sampling with a *f* NO_x400 system. Please do not hesitate to contact Cambustion for more help and advice.

Safety procedures regarding the operation of the *f* NO_x400 are in the Main *f* NO_x400 User Guide and these should be understood before operating the equipment. In particular, read the section regarding safety of gases and ventilation.

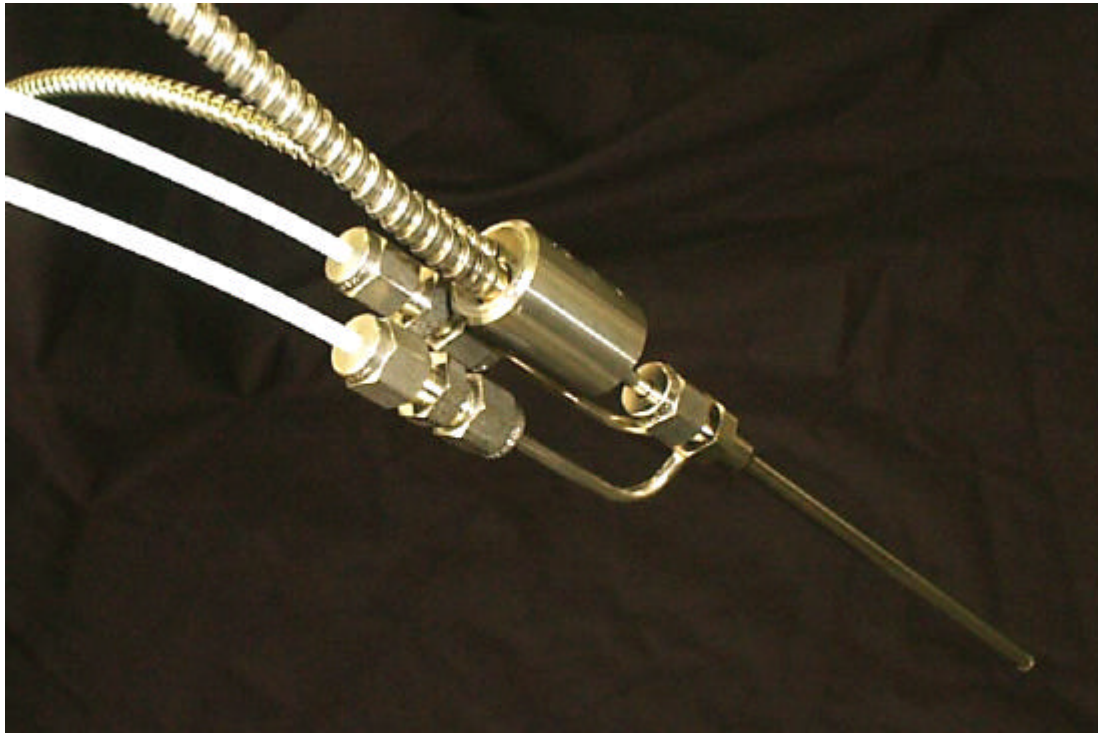
2. System Components

A full, two-channel *f* NO_x400 Fast CLD (see Figure 1) contains the following items:



Figure 1: The main items of a *f* NO_x400 Fast CLD system.

1. A two-channel Main Control Unit (*f* NOMCU).
2. A two-channel Dynamic Calibration System (DCS).
3. A two-channel Line Heater Controller (LHC).
4. Two remote sampling heads (*f* NOHEAD) with tripod stands
5. Two Heated Transfer Sample Lines (TSL-H).
6. Two Calibration Adaptor fittings (CAL-APT).
7. Pipes, fittings, tool-kit, full text manual and video supplement are also supplied.



Fitting the CAL-APT over the TSL-H.



Suitable location of the sampling system in an engine for exhaust port transient NO measurement.

Specification: **fNOx400**

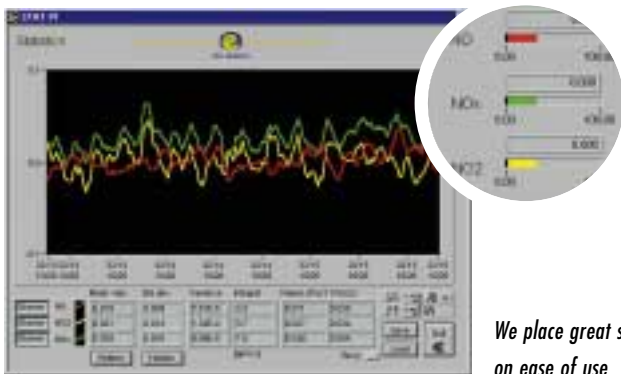
Sensitivity	~0.1mV/ppm to 50mV/ppm in 9 ranges as NO at an STP sample flow of 50cc/min.
Linearity	±1% of full scale to 5,000ppmNO ±2% of full scale to 10,000ppmNO
Noise	rms. <1% of mean for 1,000ppmNO, gain 20
Quenching	Approx. 0.7% loss in signal per 1% H ₂ O in sample Approx. 0.3% loss in signal per 1% CO ₂ in sample
Response time	90%-10% ~ 4ms with a standard sampling configuration
Ranges	500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1V/mA.
Output Voltage	-10 to +10V.
Vacuum	Pumping capacity ~15 m ³ /hr Sealed inlet capacity < 0.5 mbar
Sample	~1l/min, determined by sample tube dimensions and vacuum level. Sample flow into the CLD chamber is around 80cc/min (STP)
Ambient temperature	0–45C.
Power	107–127VAC, 220–250VAC.

CLD 700 RE ht

Chemiluminescence Analyzer



The two-channel nitrogen oxide analyzer CLD 700 RE ht is our flagship for the motor industry. No other analyzer delivers NO, NO_x and NO₂ concentrations faster and more accurately.



We place great store on ease of use

The RE ht sets standards.

When the sample is hot, humid engine exhaust gas, the CLD 700 RE ht is right in its element. Every speed change is observed, as are the high concentrations in the cold start exhaust ahead of the catalyst. But it also detects the low concentrations met afterwards. No detail of the NO and NO_x levels escapes it.



Meeting tough demands.

Nowhere else are the demands for speed and linearity in instrumentation as tough as in the engine business. The ECO PHYSICS CLD 700 RE ht handles both problems with ease. Automatic routine measurement in multishift operation or specialized measurement tasks requiring individual setting of various measurement parameters – the option is yours. Switch on and off selected modules via the interface or – specially helpful for servicing – by means of the integrated keypad. Warning and error messages are displayed with supportive help texts. The operator can control functions at one of four different access levels. The user keeps control.

Application examples.

- Vehicle drive systems
- Engine certification
- Marine and aircraft engines
- Off-road (boat motors, lawnmowers, chain saws, etc.)
- Fuel research and combustion control
- Furnaces, generators and turbines

The legislators press ahead, taking giant strides. In the automotive industry the measurement of hot, raw exhaust gases is mandated by law, and it is now only a question of time before this is extended to other areas, such as the manufacture of off-road engines. Therefore forward-looking suppliers of drive components verify the nitrogen oxide emissions of their products for the sake of both the environment and quality. Already many are doing so with the most reliable measuring instruments available – those from ECO PHYSICS.



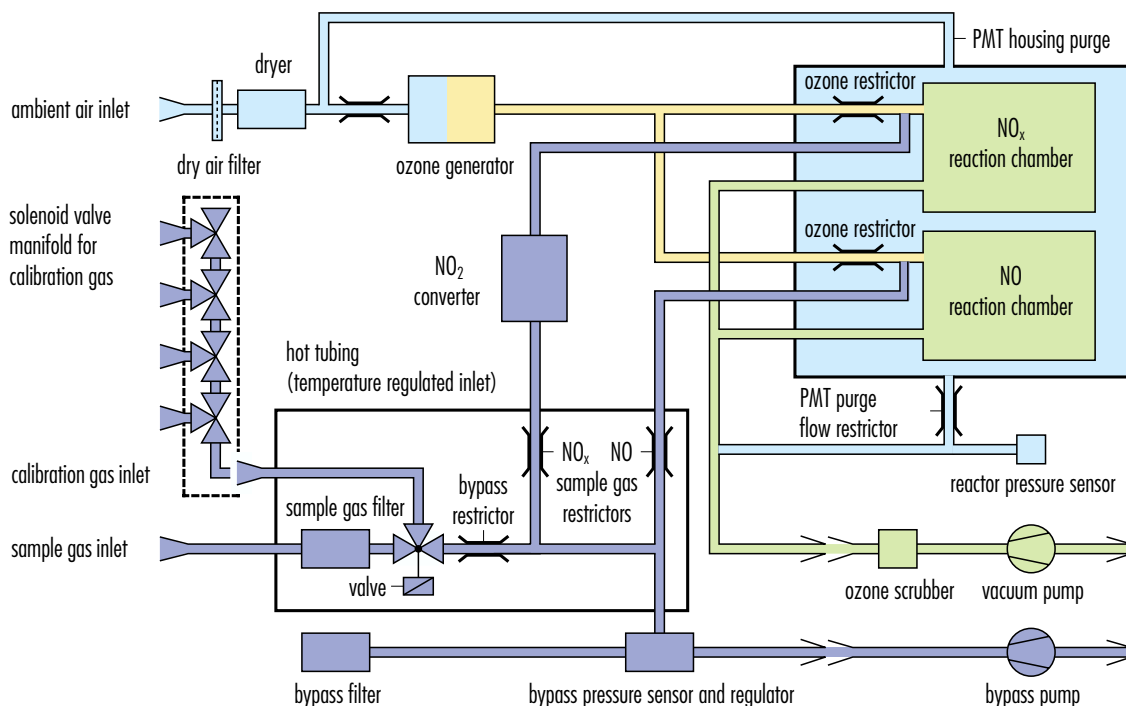
The RE ht is at the heart of every test bench

Specifications CLD 700 RE ht

Measuring ranges	four user-defined ranges from 0–10 ppm to 0–10 000 ppm	Power required	max. 810 VA (incl. vacuum pump and ozone scrubber) 230 V/50 Hz, 115 V/60 Hz
Minimal detectable concentration	0.1 ppm	Supply voltage	
Sample gas quality	dew point max. 60°C (140°F) dust and particle-free	Serial interface	RS 232C, AK protocol, CAN 0–20 mA, 4–20 mA; load resistance 500 Ω; 0–1 V, 0.2–1 V; 0–10 V, 2–10 V
Temperature range	5–190°C (41–374°F)	Analog output	
Flow rate	1.2 l/min	Dimensions	height: 133 mm; 3 HU (5 1/4") with feet: 158 mm (6 1/4") width: 483 mm (19") depth: 588 mm (23 1/8")
Input pressure	600–1200 mbar abs., (8.7–17.4 psia)	Weight	25 kg (55 lb.)
Dry air (for O₃ generator)	internally generated	Delivery includes	analyzer CLD 700 RE ht, vacuum pump, bypass pump, ozone scrubber, RS 232C cable, analog signal cable, tubing and manual
Gases	cal. gas: NO in N ₂ zero gas: N ₂		
Input pressure	2–4 bar abs. (29–58 psia)		
Pneumatic valves	1 sample gas valve, 11 cal. gas valves, with pressure regulation		
Ambient temperature (inside rack)	5–45°C (41–113°F)		

Manufactured by ECO PHYSICS in Switzerland.
Specifications subject to changes without notice (2005).

Flow diagram CLD 700 RE ht.



ECO PHYSICS

Fast Response MEXA Family

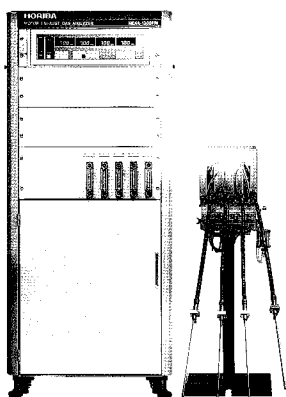
SPECIFICATIONS

	MEXA-1300FRI	MEXA-1300FRF	MEXA-1100FRF	MEXA-1100FRC	MEXA-1300FR	MEXA-1300FR	MEXA-1400FR
No. of measuring cylinder	1	4	1	1	1	1	1
Measuring component	CO, CO ₂ , HC	CO, CO ₂ , HC	T·HC	NO	CO, CO ₂ , T·HC	CO, CO ₂ , NO	CO, CO ₂ , T·HC, NO
Response time	T ₀ ≤ 100 msec at 500 mm sample piping T ₉₀ < 30 msec at 500 mm sample piping						
Repeatability	±1% of full scale						
Zero drift	±1% of full scale/1hr						
Span drift	±1% of full scale/1hr						
Linearity	±1% of full scale *						
Ambient condition	Temperature 0–40°C, relative humidity 90% max.						
Output	0–10V, 5V or 1V for each components and each cylinders						
Power	AC line, 50/60Hz (The model is available for operation on 100 (standard), 115, 220, 230 or 240 V AC upon request.)						

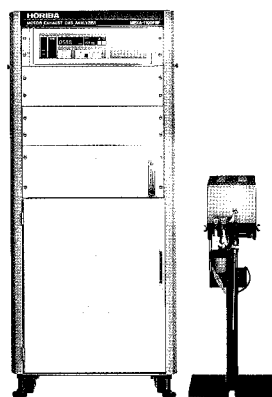
*For T·HC measurement, the linearity of ±1% of full scale is assured in case of less than 20,000 ppmC.

Measurement components and range

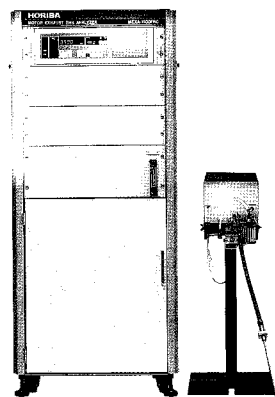
Measuring component	Principle	No. of measuring range	Measuring range
CO	NDIR	1	0–12%
CO ₂	NDIR	1	0–16%
HC	NDIR	1	0–2% (n–C ₆ H ₁₄ equivalent)
T·HC	FID	6	0–2,000/5,000/10,000/20,000/50,000/100,000 ppmC
NO	CLD	6	0–200/500/1,000/2,000/5,000/10,000 ppm



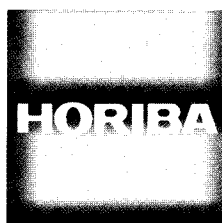
MEXA-1300FRI



MEXA-1100FRF



MEXA-1100FRC



HORIBA, Ltd.
Head Office
 Miyanohigashi, Kisshoin, Minami-ku,
 Kyoto, Japan
 Phone: (81) 75-313-8123
 Telex: (54) 22130
 Fax: (81) 75-321-5725

Tokyo Sales Office
 2-12-5 Iwamoto-cho, Chiyoda-ku,
 Tokyo, Japan
 Phone: (81) 3-3861-8231
 Fax: (81) 3-3861-8259

**HORIBA ASIA/PACIFIC
 REPRESENTATIVE OFFICE**
 Parkway Parade #67-03
 80, Marine Parade Road, Singapore, 1544
 Phone: (65) 3453030 Telex: (87) 37257
 Fax: (65) 3452930

HORIBA KOREA LTD.
 #12-1, Todang-Dong, Chung-ku
 Puchon, Kyonggi-do, Korea
 Phone: (82) 32-675-8201
 Fax: (82) 32-675-8205

HORIBA INSTRUMENTS INCORPORATED
Irvine Facility
 17671, Armstrong Avenue, Irvine,
 Calif. 92714, U.S.A.
 Phone: (1) 714-250-4811
 Fax: (1) 714-250-0924

Ann Arbor Facility
 3901 Varsity Drive, Ann Arbor,
 Michigan 48108, U.S.A.
 Phone: (1) 313-973-2171
 Telex: (23) 0230176
 Fax: (1) 313-973-7868

Silicon Valley Office
 1050E, Duane Ave., Suite J,
 Sunnyvale, California 94086, U.S.A.
 Phone: (1) 408-730-4772
 Fax: (1) 408-730-8975

HORIBA INSTRUMENTS LIMITED
 1 Harrowden Road, Brackmills
 Northampton, NN4 0E9 England
 Phone: (44) 604-765171
 Telex: (51) 311869
 Fax: (44) 604-765175

Bulletin:HRE-2223B

HORIBA EUROPE GmbH
 Industriestrasse 8, W-6374 Steinbach,
 Germany
 Phone: (49) 6171-7040
 Telex: (41) 410829
 Fax: (49) 6171-8044

HORIBA EUROPE Branch Offices
HORIBA FRANCE
 Rue L. et A. Lumière Technoparc
 01630 ST-GÉNIS-POUILLY, France
 Phone: (33) 50-42-27-63
 Telex: (42) 385-054 Fax: (33) 50-42-07-74

HORIBA AUSTRIA
 Kaplanstraße 5, A-3430 Tulln,
 Austria
 Phone: (43) 2272-5225
 Telex: (47) 136482 Fax: (43) 2272-5230

HORIBA SWITZERLAND
 Av. des Baumettes 11-13
 CH-1020 Rerens, Switzerland
 Phone: (41) 21-635-77-41
 Telex: (45) 455-354 Fax: (41) 21-635-40-82

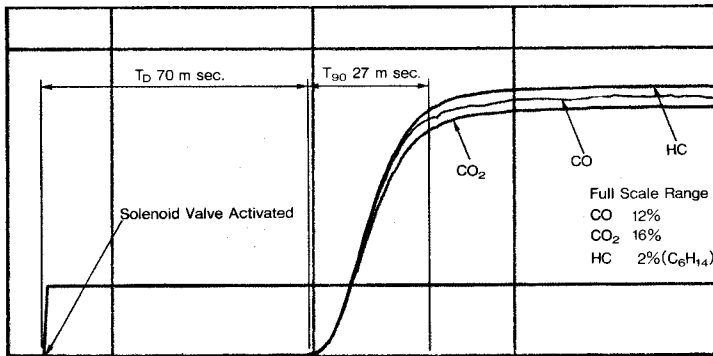


Fig. 1: Sample change in transient response.

The analyzer unit is designed to be installed close to the engine sample points. Fig. 1 shows the response of the instrument when the solenoid valve is switched from zero to span gas. The dead time from solenoid activation to first response is approximately 70 milliseconds. T_{90} response is 27 milliseconds. The three signals — CO, CO₂, and HC — respond simultaneously. Measurements from two different sample lines showed response times of within 5 milliseconds for T_d and within 2 milliseconds for T_{90} .

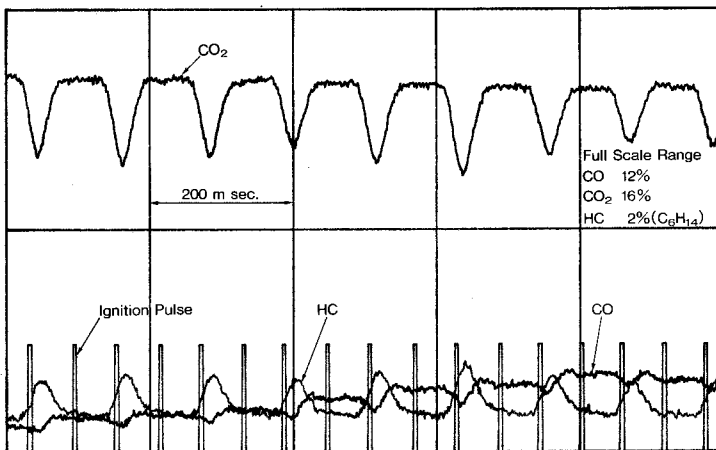


Fig. 2: Cyclic change of exhaust gas.

Fig. 2 shows steady state measurements at approximately 1000 RPM, with no load. The cycle-to-cycle changes in exhaust gas concentrations are shown synchronized with every second ignition pulse of cylinder number 3. (In this engine, ignition pulses occur twice each cycle.)

Condition

- * Engine: 4-cylinder, 400 cc motorcycle engine
- * The exhaust manifold was separated into four individual lines.
- * The sample probes were attached to the exhaust manifold.

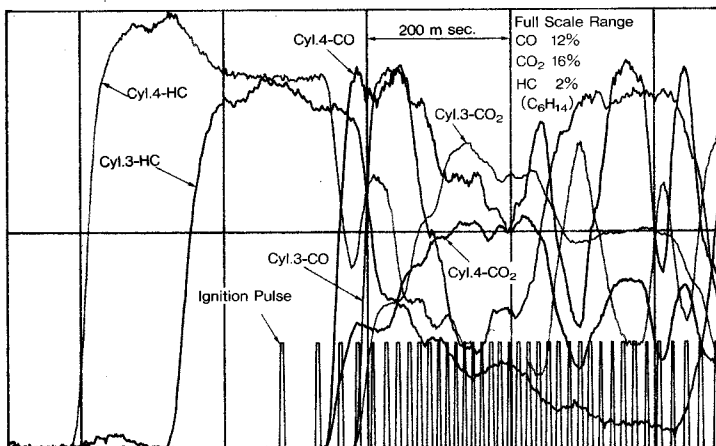
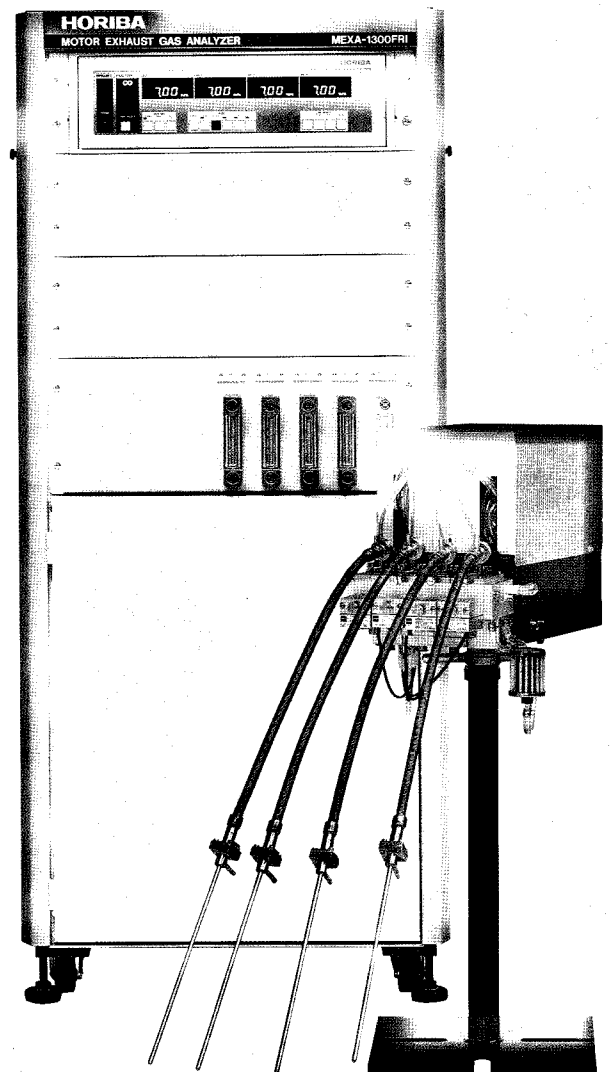


Fig. 3: Results from two cylinders of engine start.

Figure 3 shows measurements of two adjacent cylinders (Nos. 3 and 4) made during cranking. Note that the concentration of HC increases first, preceding the increase in concentration of CO and CO₂. These results show the time delay between events.

This new, fast response analyzer can adequately measure the cyclic changes in gas concentrations from each cylinder of multiple-cylinder engines.



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΥΡΙΤΙΚΟ ΓΙΑΛΙ

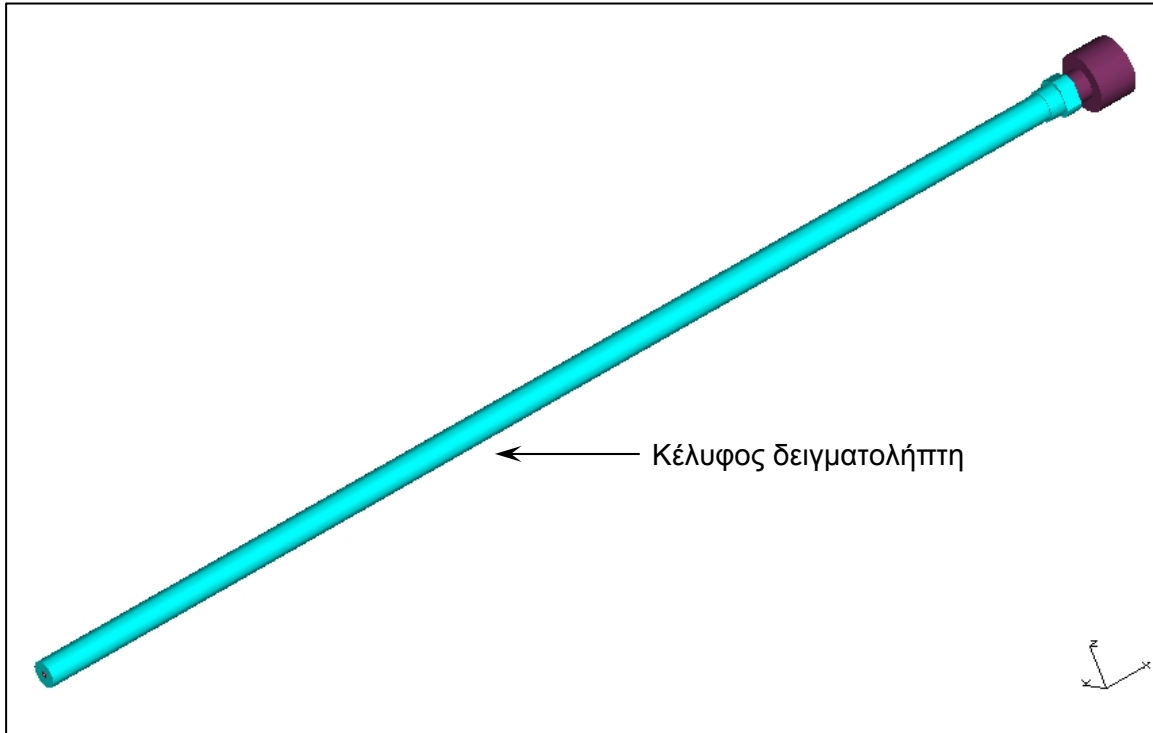
Density	2.2x10 ³ kg/m ³
Hardness	5.5 - 6.5 Mohs' Scale 570 KHN 100
Design Tensile Strength	4.8x10 ⁷ Pa (N/m ²) (7000 psi)
Design Compressive Strength	Greater than 1.1 x 10 ⁹ Pa (160,000 psi)
Bulk Modulus	3.7x10 ¹⁰ Pa (5.3x10 ⁶ psi)
Rigidity Modulus	3.1x10 ¹⁰ Pa (4.5x10 ⁶ psi)
Young's Modulus	7.2x10 ¹⁰ Pa (10.5x10 ⁶ psi)
Poisson's Ratio	0.17
Coefficient of Thermal Expansion	5.5x10 ⁻⁷ cm/cm .°C (20°C-320°C)
Thermal Conductivity	1.4 W/m .°C
Specific Heat	670 J/kg .°C
Softening Point	1683 °C
Annealing Point	1215 °C
Strain Point	1120 °C
Electrical Resistivity	7x10 ⁷ ohm cm (350 °C)
Dielectric Properties	(20 °C and 1 MHz)
Constant	3.75
Strength	5x10 ⁷ V/m
Loss Factor	Less than 4x10 ⁻⁴
Dissipation Factor	Less than 1x10 ⁻⁴
Index of Refraction	1.4585
Constringence (Nu)	67.56
Velocity of Sound-Shear Wave	3.75x10 ³ m/s
Velocity of Sound/Compression Wave	5.90x10 ³ m/s
Sonic Attenuation	Less than 11 db/m MHz
Permeability Constants	(cm ³ mm/cm ² sec cm of Hg)
(700°C)	
Helium	210x10 ⁻¹⁰
Hydrogen	21x10 ⁻¹⁰
Deuterium	17x10 ⁻¹⁰
Neon	9.5x10 ⁻¹⁰

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟ ΑΤΣΑΛΙ

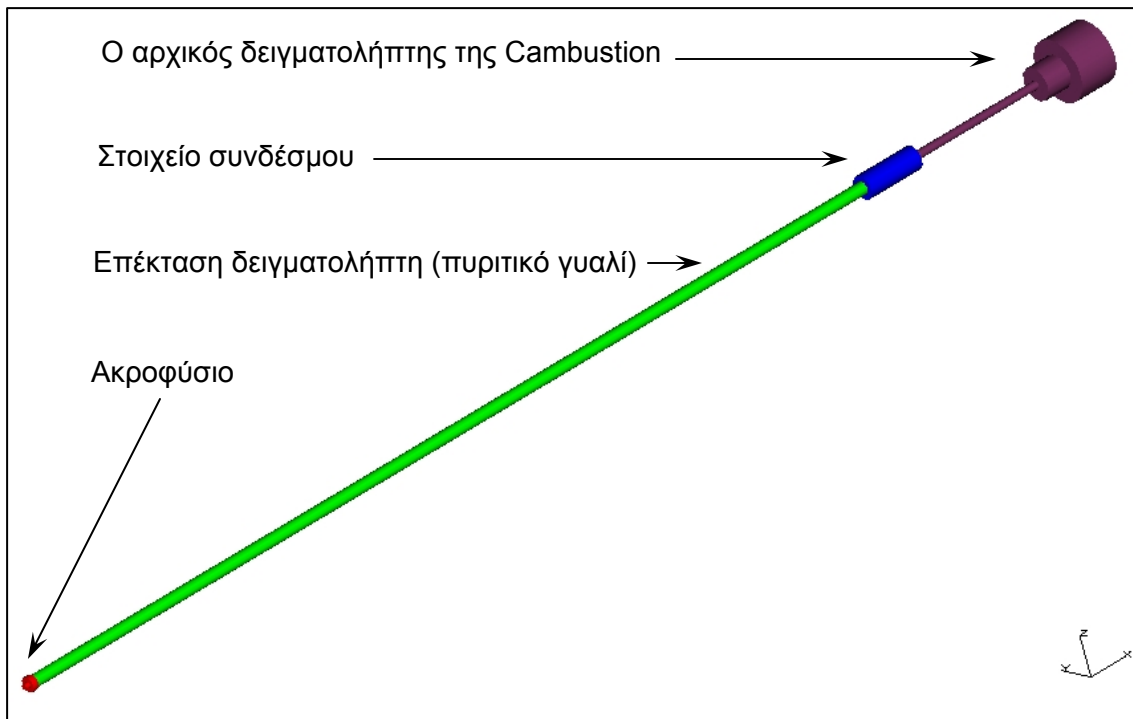
Tensile Strength (MPa)	500
Proof Stress 0.2% (MPa)	190
Elongation A5 (%)	35
Hardness Rockwell (HB)	262 max
Density	8.03 g/cm ³
Melting Point	1455°C
Modulus of Elasticity	193 GPa
Electrical Resistivity	0.072x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	16.3 W/m.K at 100°C
Thermal Expansion	17.3x10 ⁻⁶ /K at 100°C

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

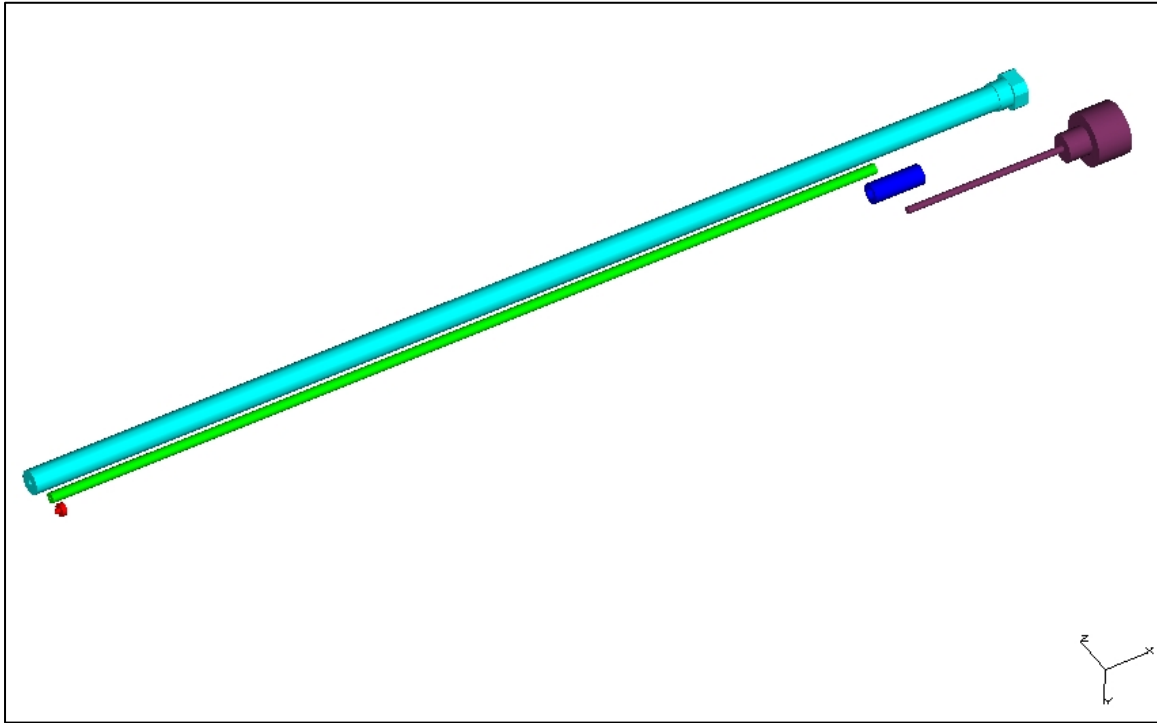
**ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΕΣ
ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ**



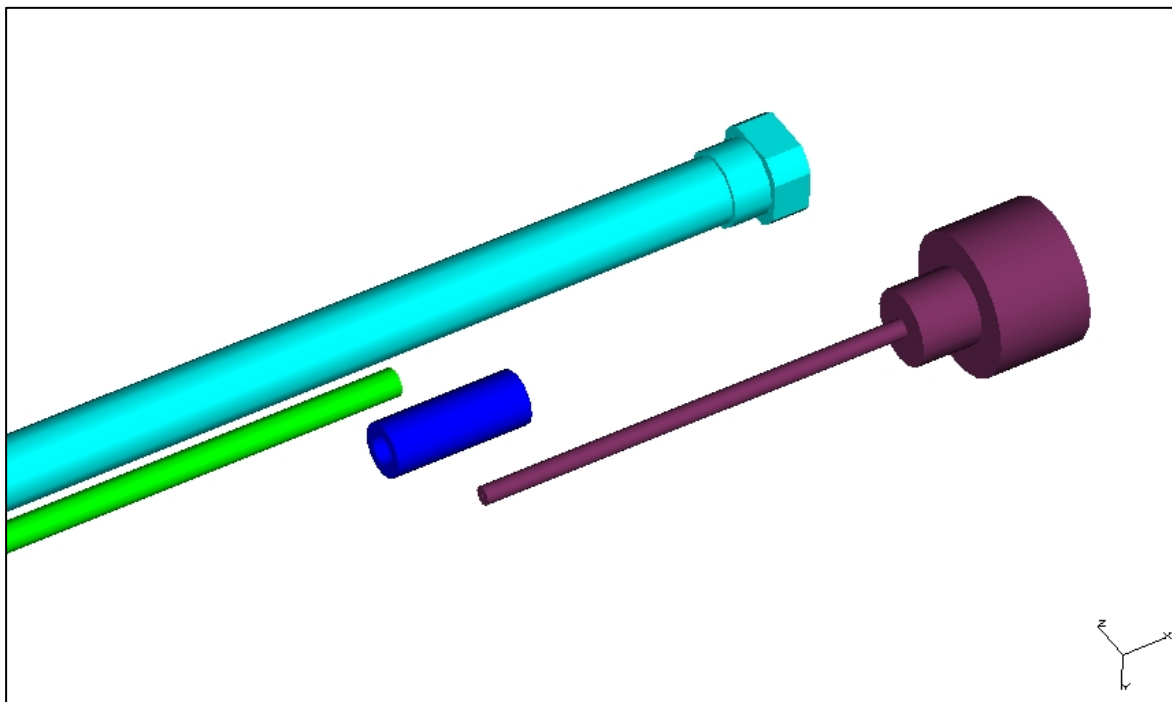
Ο Δειγματολήπτης συναρμολογημένος



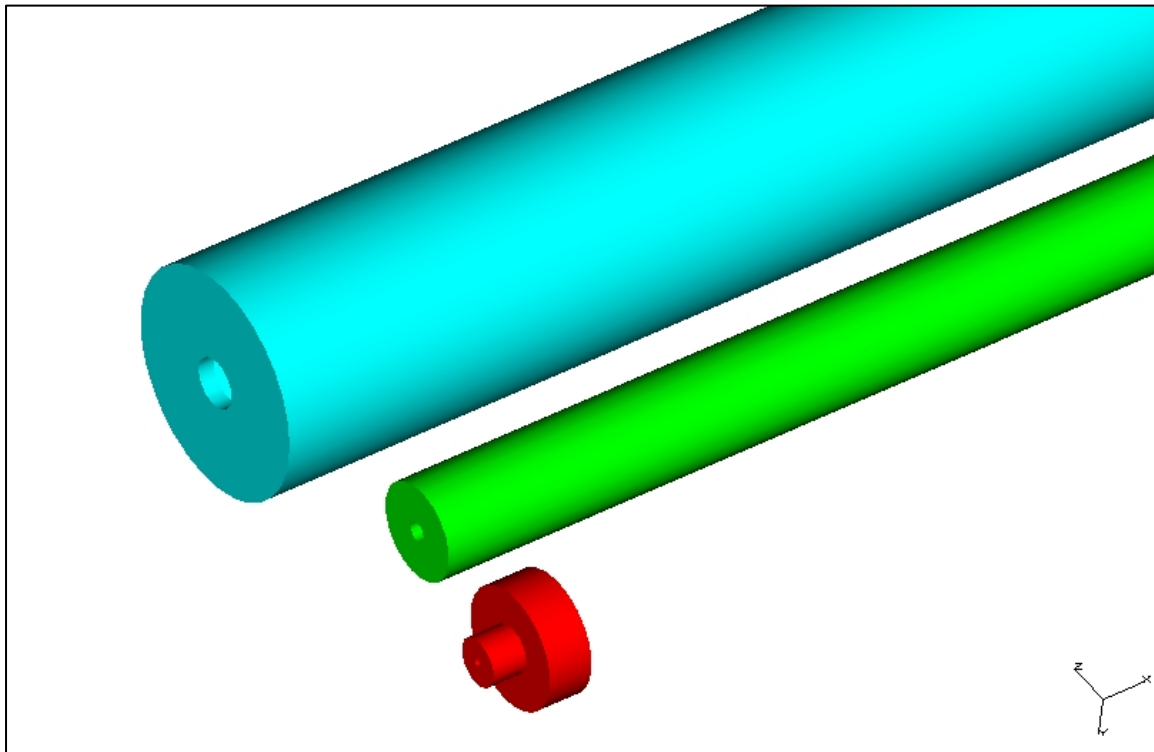
Τα διάφορα μέρη του δειγματολήπτη



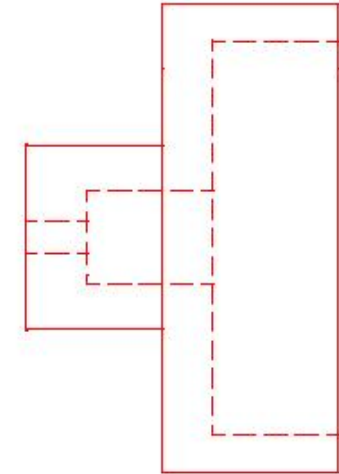
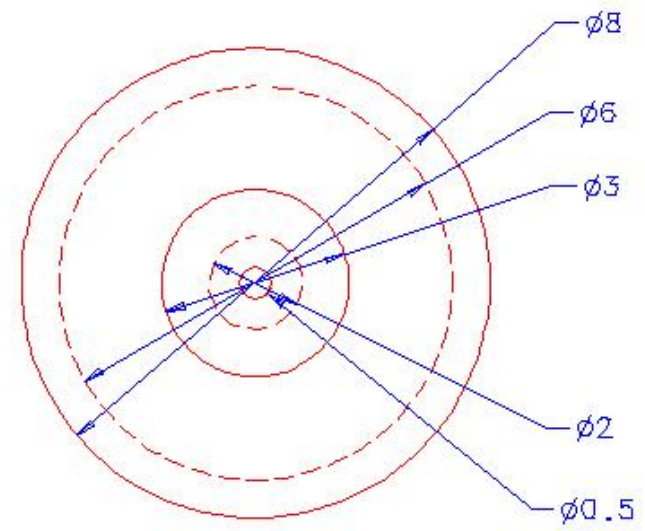
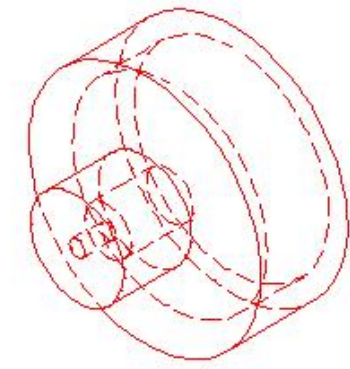
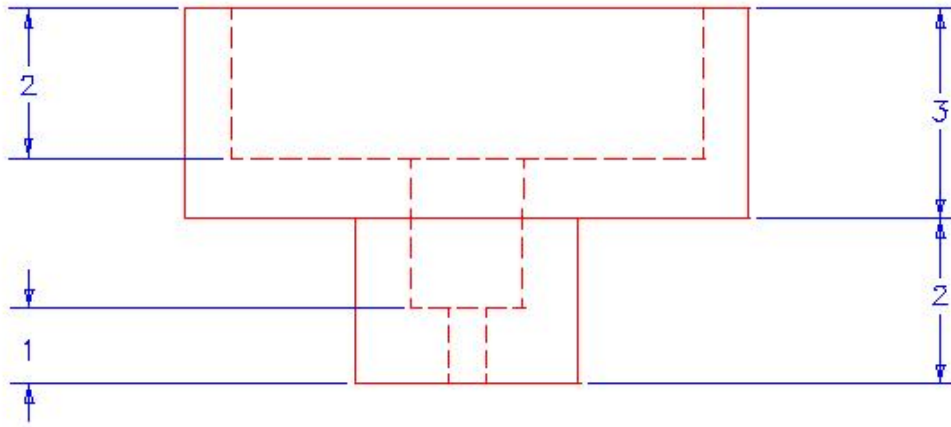
Τα διάφορα μέρη του δειγματολήπτη σε εξάρμωση



Τα διάφορα μέρη του δειγματολήπτη σε εξάρμωση

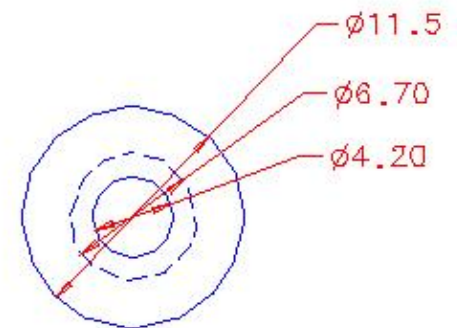
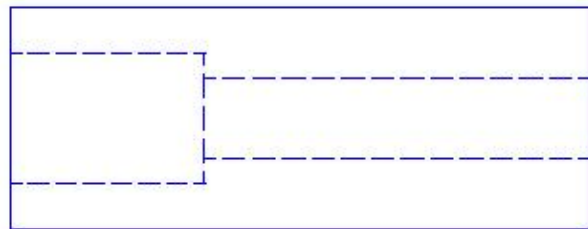
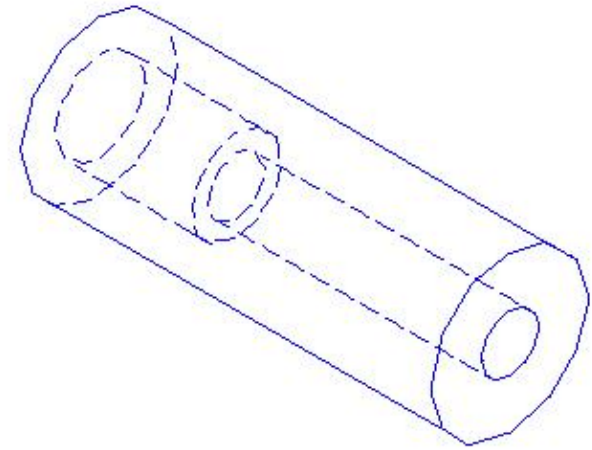
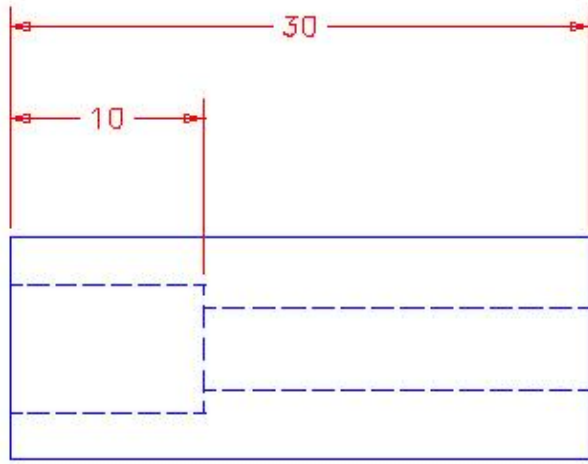


Τα διάφορα μέρη του δειγματολήπτη σε εξάρμωση



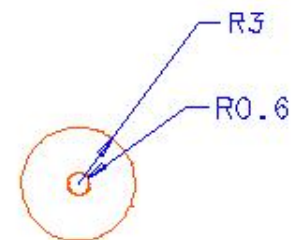
Component: Nozzle
 Material: Steel
 Projection: 3rd
 Dimensions: mm

Τεχνικό Σχέδιο Ακροφύσιου



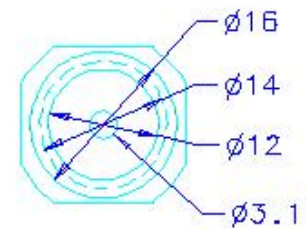
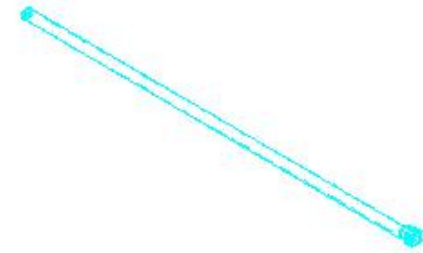
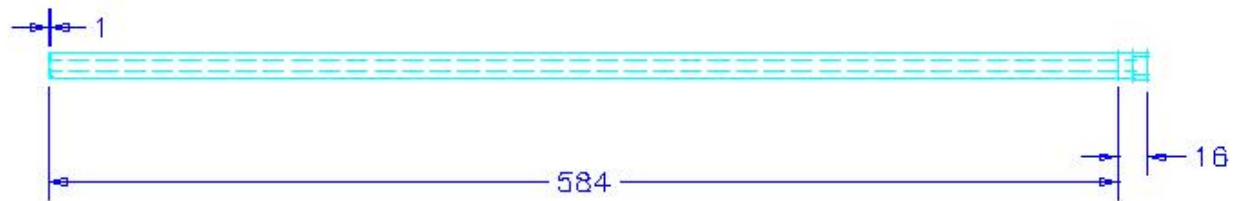
Component: Probe adapter
Material: Steel
Projection: 3rd
Dimensions: mm

Τεχνικό Σχέδιο στοιχείου σύνδεσης



Component: Probe extension
Material: Quartz Glass
Projection: 3rd
Dimensions: mm

Τεχνικό Σχέδιο επέκτασης δειγματολήπτη (πυριτικό γυαλί)



Component: Probe Cover
Material: Stainless Steel
Projection: 3rd
Dimensions: mm

Τεχνικό Σχέδιο κελύφους δειγματολήπτη