



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ ΓΙΑ ΤΑΧΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ
ΑΖΩΤΟΥ (NO_x) ΣΤΟΝ ΑΥΛΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL**

ΞΕΠΑΠΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2009

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΥΡΤΑΤΟΣ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κο Νικόλαο Κυρτάτο, για την καθοδήγηση και την παραχώρηση των απαιτούμενων μέσων για την υλοποίηση της διπλωματικής μου εργασίας. Τον επιστημονικό συνεργάτη κο Μάριο Ιωάννου, για την οργάνωση του θέματος και τη συνεργασία σε όλα τα βήματα της εκπόνησης της εργασίας. Τον επιστημονικό συνεργάτη κο Τιμολέων Στέλιο για την βοήθεια στη διεξαγωγή των πειραμάτων και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Ακόμη, τον κο Νικόλαο Αλεξανδράκη και τον κο Γιώργο Παπαλάμπρου για την διεξαγωγή των μετρήσεων στον κινητήρα. Τέλος, τους τεχνικούς του εργαστηρίου, κο Χρήστο Σαρρή και κο Γιώργο Τσιλάκη, για τη βοήθεια στη λειτουργία μηχανημάτων και την κατασκευή απαιτούμενων εξαρτημάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΡΟΟΙΜΙΟ.....	8
1.1 Τα οξείδια του αζώτου και η σχετική νομοθεσία	8
1.2 Μέθοδος μέτρησης NO _x	9
1.3 Επισκόπηση του αναλυτή fNO _x 400 Fast CLD της CMBUSTION	11
1.4 Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος	13
1.5 Στόχος διπλωματικής εργασίας	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ.....	16
Εισαγωγή	16
2.1 Ισόθερμη ροή σε αγωγό σταθερής διατομής	17
2.1.1 Εξίσωση διατήρησης της μηχανικής ενέργειας	18
2.1.2 Εξίσωση συνέχειας.....	20
2.1.3 Υπολογισμός παροχής μάζας	21
2.1.4 Αριθμός Reynolds και μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή.....	23
2.1.5 Ο παράγοντας της τριβής.....	23
2.1.6 Σχέσεις ανάμεσα στις παραμέτρους της επιδερμικής τριβής (skin friction).....	24
2.1.7 Ο συντελεστής τριβής Fanning.....	25
2.1.8 Το διάγραμμα Fanning	27
2.1.9 Αριθμός Mach.....	29
2.1.10 Κινηματικό και δυναμικό ιξώδες καυσαερίων	29
2.2 Ανάλυση ροής στο δειγματολήπτη.....	30
2.2.1 Περιγραφή υπολογισμών	31
2.2.2 Συντελεστής τριβής.....	33
2.3 Αποτελέσματα θεωρητικής ανάλυσης.....	34
2.3.1 Επίδραση μεταβολής μήκους δειγματολήπτη	34
2.3.2 Επίδραση μεταβολής εσωτερικής διαμέτρου δειγματολήπτη.....	35
2.3.3 Επίδραση υλικού κατασκευής δειγματολήπτη.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ	38
Εισαγωγή	38
3.1 Επιλογή κατασκευαστικών και σχεδιαστικών παραμέτρων	38
3.2 Σχεδιασμός επεκτάσεων δειγματοληψίας	40
3.3 Επιλογή διαστάσεων και σχεδιασμός εξωτερικού αγωγού στήριξης.....	41
3.4 Σχεδιασμός επιπρόσθετων εξαρτημάτων και τελικών διεργασιών για την υλοποίηση της εφαρμογής.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΑΠΕΖΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	45
Εισαγωγή	45
4.2.1 Διερεύνηση δειγματοληπτών διαφορετικών διαμέτρων	46
4.2.1.2 Υπολογισμοί κρίσιμων χρονικών παραμέτρων	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	56
Εισαγωγή	56
5.1 Υπολογισμοί κρίσιμων χρονικών παραμέτρων μετρήσεων σε ναυτικό κινητήρα	56
5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων των επεκτάσεων διαφορετικής διαμέτρου	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
6.1 Διερεύνηση εκτεταμένου δειγματολήπτη στην τράπεζα δοκιμών	67
6.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων των διάφορων δειγματοληπτών εσωτερικής διαμέτρου 0.66mm.....	69
6.2 Διερεύνηση εκτεταμένου δειγματολήπτη υπό κανονικές συνθήκες καύσης	73
6.3 Συμπεράσματα – Αποτελέσματα	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	80

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

CLD – Chemiluminescence Detector

CP – Constant Pressure

EVO – Exhaust Valve Opening

ICCT – The International Council on Clean Transportation

IMO – International Maritime Organization

MARPOL – Marine Pollution

MEPC – Marine Environment Protection Committee

NTC – NO_x Technical Code

PM – Particulate Matter

NO_x – Nitric Oxides

NO – Nitric Oxide

NO₂ – Nitrogen Dioxide

SO_x – Sulfuric Oxides

RT – Rise Time

DT – Delay Time

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ωκεανοπόρα πλοία συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x), του θείου (SO_x) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Εκτιμάται ότι έως το 2020, οι εκπομπές των πλοίων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) σε NO_x και SO_x θα ξεπεράσουν τις συνολικές εκπομπές που δημιουργούνται από όλες τις επίγειες πηγές εκπομπής ρύπων, κινητές και σταθερές.

Η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και οι επιπτώσεις από τα ποντοπόρα πλοία είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις λιμενικές πόλεις και τα έθνη με εκτενείς ακτές που γειτονεύουν με τις πλωτές οδούς. Σε σχέση με άλλους τομείς, η ρύθμιση των εκπεμπόμενων ρύπων για τα εμπορικά πλοία αποτελεί μια σημαντική πολιτική και νομική πρόκληση, δεδομένου ότι τα πλοία λειτουργούν σε μεγάλο βαθμό εκτός των εθνικών συνόρων.

Τα ωκεανοπόρα πλοία υπόκεινται κυρίως σε εποπτεία από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), ο οποίος υπόκειται στη δικαιοδοσία των Ηνωμένων Εθνών. Τα πρότυπα του IMO εκδόθηκαν αρχικά το 1997 και αποτέλεσαν σχετική βελτίωση στις εκπομπές αερίων ρύπων.[1]

Προκειμένου να ενισχυθεί ο αειφόρος χαρακτήρας των θαλάσσιων μεταφορών θα πρέπει η ρύπανση από την ποντοπόρο ναυτιλία όχι μόνο να ελεγχθεί, αλλά και να μειωθεί σημαντικά. Η απαίτηση αυτή οδηγεί στη διαρκή έρευνα στον τομέα της ανάπτυξης τεχνολογιών για τη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από τους ναυτικούς κινητήρες Diesel, αλλά και στην ανάπτυξη τεχνολογιών και μηχανημάτων για την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση των επιπέδων συγκέντρωσης των αερίων ρύπων, NO_x και SO_x , από τα παραγόμενα καυσαέρια των κινητήρων εσωτερικής καύσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε σε θεωρητικό αλλά και σε πειραματικό επίπεδο η δυνατότητα προσαρμογής του δειγματολήπτη του αναλυτή της Combustion Ltd., μοντέλο fNO_x 400, σε ναυτικούς κινητήρες. Ο αναλυτής αυτός προορίζεται από τον κατασκευαστή του για ταχεία μέτρηση των οξειδίων του αζώτου σε μικρούς τετράχρονους κινητήρες αυτοκινήτων. Ο αναλυτής παρέχει την δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης των NO_x εντός ενός κύκλου λειτουργίας του κινητήρα, λόγω του πολύ μικρού χρόνου απόκρισης. Η μέτρηση των NO_x από συγκεκριμένο κύλινδρο κινητήρα, μέσα σε ένα κύκλο λειτουργίας του, είναι πολύ σημαντική κατά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός κινητήρα. Η μέτρηση αυτή, δίνει τη δυνατότητα στον κατασκευαστή να τροποποιήσει σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα, ώστε να βελτιστοποιήσει το σύστημα καύσης και να μειώσει τις εκπομπές των NO_x .

Στόχος της παρούσας εργασίας, ήταν η επιλογή κατάλληλων διαστάσεων και η ανάπτυξη νέου δειγματολήπτη, ο οποίος να βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλους ναυτικούς κινητήρες και ταυτόχρονα να διατηρηθούν οι χαμηλές χρονικές παράμετροι (χρόνος απόκρισης) του μετρητικού συστήματος. Βασικό περιορισμό στη δημιουργία της διάταξης αποτέλεσε το μήκος του δειγματολήπτη, δεδομένου ότι αυτός έπρεπε να φτάνει μέσω του αγωγού εξαγωγής καυσαερίων, έως το πίσω μέρος της βαλβίδας εξαγωγής του εκάστοτε ελεγχόμενου κυλίνδρου, προκειμένου να είναι δυνατή η δειγματοληψία από τον συγκεκριμένο κύλινδρο, σε ένα κύκλο λειτουργίας της ναυτικής μηχανής. Η μεγάλη αύξηση του μήκους όμως θα επέφερε δραματική αύξηση στο χρόνο απόκρισης του μετρητικού συστήματος και προκειμένου να περιοριστεί όσο το δυνατό περισσότερο το φαινόμενο αυτό, η ροή στο εσωτερικό του δειγματολήπτη έπρεπε να είναι τυρβώδης.

Σε πρώτη φάση (Κεφάλαιο 2), πραγματοποιήθηκε θεωρητική ανάλυση της ροής στον δειγματολήπτη με χρήση αρχών της Μηχανικής Ρευστών με σκοπό μια αρχική εκτίμηση του βέλτιστου λόγου μήκους προς διάμετρο του δειγματολήπτη, λαμβάνοντας υπ' όψη την επίδραση της τριβής.

Σε δεύτερη φάση (Κεφάλαιο 3), πραγματοποιήθηκε λεπτομερής σχεδιασμός και κατασκευή διαφορετικών δειγματοληπτών, με βάση τα αποτελέσματα από τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκε, με σκοπό την πειραματική διερεύνηση των διαφορετικών δειγματοληπτών.

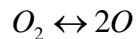
Σε επόμενη φάση (Κεφάλαιο 4), κατασκευάστηκαν οι δειγματολήπτες και εξετάστηκαν σε τράπεζα δοκιμών (flow bench) έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση του μήκους και της διαμέτρου αυτών στην ταχύτητα δειγματοληψίας.

Σε τελικό στάδιο (Κεφάλαιο 5), διεξήχθησαν μετρήσεις ρύπων NO στον ναυτικό κινητήρα Diesel MAN L16/24, με τους υπό εξέταση δειγματολήπτες έτσι ώστε να διερευνηθεί η ταχύτητα δειγματοληψίας στα διάφορα φορτία λειτουργίας του κινητήρα. Στο τελευταίο αυτό στάδιο βασίστηκε και η αξιολόγηση του αποτελέσματος της παρούσας μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΡΟΟΙΜΙΟ

1.1 Τα οξειδία του αζώτου και η σχετική νομοθεσία

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), από ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης, εξαρτώνται από τις διάφορες παραμέτρους λειτουργίας του κινητήρα. Οι παράμετροι αυτές, είναι το φορτίο, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ο χρονισμός ανάφλεξης (ignition timing), ο χρονισμός έκχυσης του καυσίμου (injection timing) και ο λόγος αέρα καυσίμου. Ο σχηματισμός των NO_x στηρίζεται σε μία σειρά αντιδράσεων κατά την καύση, όπως περιγράφει ο μηχανισμός του Zeldovich [2]:



Η κινηματική των χημικών αντιδράσεων, δείχνει ότι ο σχηματισμός NO και άλλων νιτρικών οξειδίων, εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία της φλόγας στο θάλαμο καύσης και δευτερευόντως, από τη διάρκεια της καύσης. Ο ταχύτερος ρυθμός σχηματισμού NO παρατηρείται για ελαφρώς φτωχότερα του στοιχειομετρικού, μίγματα. [2]

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) δημιούργησε το 1997, το παράρτημα VI της MARPOL 73 / 78 και τον Τεχνικό Κώδικα των οξειδίων του αζώτου (NO_x Technical Code), που αφορά στις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου από ναυτικούς κινητήρες diesel, με στόχο τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Τον Ιούλιο του 2005 έγιναν τροποποιήσεις στο παράρτημα VI και η γενική αναθεώρηση του παραρτήματος αυτού, που έγινε τον Οκτώβριο του 2008, στα πλαίσια της 58^{ης} συνόδου της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), έχει μειώσει περαιτέρω τα αποδεκτά όρια των εκπομπών NO_x και SO_x , με αναδρομική ισχύ, το έτος 2000.

Τα επιτρεπόμενα όρια καθορίζονται από τον τεχνικό κώδικα του παραρτήματος, σύμφωνα με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, σε εκπεμπόμενα γραμμάρια NO_x ανά κιλοβατώρα (gr/kWh). Ο κανονισμός, υποχρεώνει τους πλοιοκτήτες να παρακολουθούν τις εκπομπές NO_x από τις μηχανές των πλοίων και να επαληθεύουν την απαίτηση, με εξαίρεση των πολύ μικρών σκαφών. Σύμφωνα με τον τεχνικό κώδικα, τα πλοία που εκτελούν διεθνή δρομολόγια πρέπει να φέρουν έγκυρα διεθνή πιστοποιητικά που μπορούν να γίνουν αποδεκτά σε ξένα λιμάνια ως αποδεικτικά στοιχεία ότι το πλοίο συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της σύμβασης.

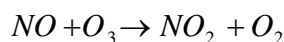
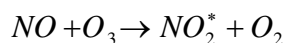
Για την απόδειξη της συμμόρφωσης με τους σχετικούς κανονισμούς για τις εκπομπές NOx στο πλοίο, ο πλοιοκτήτης, μπορεί να χρησιμοποιήσει έναν από τους ακόλουθους τρεις τρόπους [3]:

- “Μέθοδος ελέγχου των παραμέτρων του κινητήρα”, σύμφωνα με την παράγραφο 6.2 του NTC, για να βεβαιωθεί η σωστή λειτουργία και ότι οι τιμές δεν έχουν παρεκκλίνει από τις προδιαγραφές του τεχνικού φακέλου για την εκπομπή NOx του κινητήρα. Στα πλαίσια περιοδικής ή ενδιάμεσης επιθεώρησης ελέγχονται τα εξαρτήματα που αλλάχθηκαν εάν συμφωνούν με τα ανταλλακτικά που ορίζονται από τον κατασκευαστή και αν οι μετατροπές που πραγματοποιήθηκαν συμφωνούν με τον τεχνικό φάκελο του πλοίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος για εναρμόνιση με τις απαιτήσεις του τεχνικού κώδικα για έλεγχο των οξειδίων του αζώτου, απαιτεί αρκετό χρόνο κατά την επιθεώρηση και ενδεχομένως να απαιτηθεί απευθείας μέτρηση ρύπων, εάν η επιθεωρούσα αρχή έχει ενδείξεις μη συμμόρφωσης με τους θεσπισμένους κανονισμούς.
- “Απλοποιημένη μέθοδος μέτρησης”, των διαφόρων παραμέτρων σύμφωνα με την παράγραφο 6.3 του NTC . Σε αυτήν την περίπτωση, η επιθεωρούσα αρχή κατά την περιοδική ή ενδιάμεση επιθεώρηση, επιβλέπει την δειγματοληψία και μέτρηση των καυσαερίων με απλοποιημένο εξοπλισμό, από κάθε μηχανή, σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αποβεί χρονοβόρα και με υψηλό κόστος σε περίπτωση που οι συνθήκες λειτουργίας που ορίζονται από την επιθεώρηση, δεν ταυτίζονται με την προγραμματισμένη λειτουργία της μηχανής.
- “Άμεση μέθοδος μέτρησης και παρακολούθησης”, ο IMO παρέχει τον οδηγό "Οδηγίες για επί πλοίου διαδικασία ελέγχου NOx – άμεση μέθοδος μέτρησης και παρακολούθησης." Η συγκεκριμένη μέθοδος ορίζει την απευθείας συνεχόμενη μέτρηση και παρακολούθηση των εκπεμπόμενων ρύπων, από εξοπλισμό που βρίσκεται μόνιμα εγκατεστημένος επί πλοίου. Το σύστημα έχει εγκατασταθεί επί πλοίου, ελεγχθεί και επιθεωρηθεί κατά την αρχική επιθεώρηση του πλοίου. Σε περιπτώσεις περιοδικών ή ενδιάμεσων επιθεωρήσεων, η επιθεωρούσα αρχή δεν χρειάζεται να πραγματοποιήσει καμία μέτρηση και απλά ελέγχει την λειτουργία του εγκατεστημένου συστήματος και τις σχετικές αναφορές που συντάσσονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (περίπου 30 ημερών).

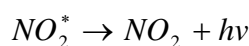
1.2 Μέθοδος μέτρησης NOx

Στις προδιαγραφές των διεθνών κανονισμών για την αρχή λειτουργίας του αναλυτή μέτρησης οξειδίων του αζώτου, εντάσσεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της συγκέντρωσης NO στα καυσαέρια κινητήρα εσωτερικής καύσης, στην παρούσα εργασία. Η μέθοδος αυτή είναι η ηχητική φωταύγεια, και στηρίζεται στην ιδιότητα του οξειδίου του αζώτου (NO) να αντιδρά με το όζον (O₃) και να παράγει διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και οξυγόνο (O₂).

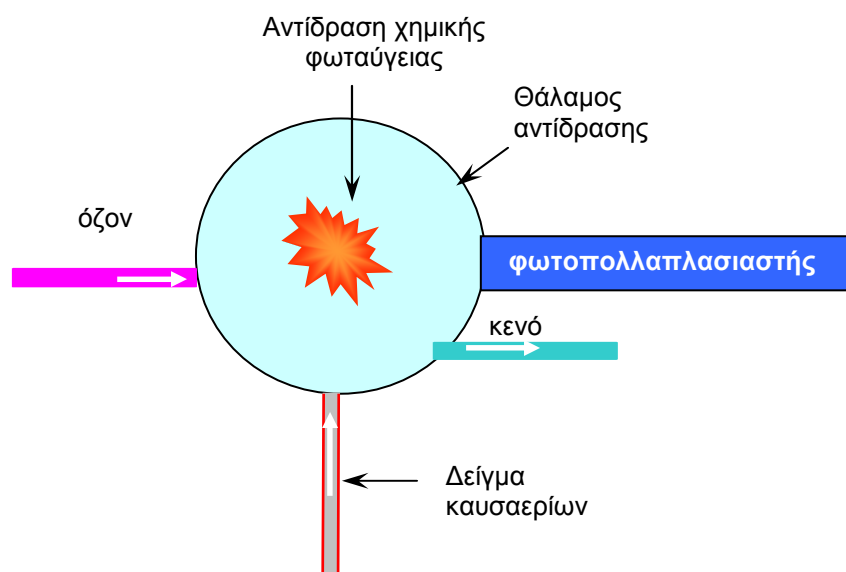
Η ποσότητα των καυσαερίων που καταλήγει στο θάλαμο αντίδρασης, αναμιγνύεται με όζον (O_3), το οποίο παράγεται από κατάλληλη διάταξη του μηχανήματος. Η αντίδραση των ενώσεων περιγράφεται ακολούθως:



Το ποσοστό του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) που βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση αντιπροσωπεύει το 20% του συνολικού παραγόμενου διοξειδίου του αζώτου. Το διεγερμένο διοξειδίο του αζώτου (NO_2^*), κατά την ενεργειακή του μετάπτωση σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη, εκπέμπει φωτόνια, μήκους κύματος 600 - 3000nm.



Η παραπάνω διαδικασία συμβαίνει μέσα σε θάλαμο αντίδρασης υπό σταθερές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και η εκπεμπόμενη ακτινοβολία συλλέγεται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή, ο οποίος διοχετεύει το σήμα στο μετρητικό μηχανήμα. Δεδομένου ότι, το παρεχόμενο όζον βρίσκεται σε περίσσεια μέσα στο θάλαμο αντίδρασης, η ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (χημικής φωταύγειας) που παράγεται, είναι ανάλογη της αρχικής συγκέντρωσης σε NO των καυσαερίων που εισήχθησαν στη μετρητική διάταξη και με κατάλληλες μετατροπές σήματος μεταφράζεται σε συνολικά επίπεδα συγκέντρωσης NO στο δείγμα. Το εναπομένον δείγμα στο θάλαμο αντίδρασης απομακρύνεται από κατάλληλη διάταξη κενού. Η διαδικασία αυτή παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης των NO στο καυσαέριο.[4] Για την αντίστοιχη μέτρηση NO_2 απαιτείται ειδικός μετατροπέας, ο οποίος σε θερμαινόμενο θάλαμο στους $300^{\circ}C$, αναμειγνύει το καυσαέριο με κάποιο αναγωγικό μέσο και το NO_2 μετατρέπεται σε NO. Εν συνεχεία, η διαδικασία μέτρησης της συγκέντρωσης (σε NO_2), είναι η παραπάνω. Στην παρούσα μελέτη δεν διατιθένταν μετατροπέας για την μέτρηση NO_2 . [4]



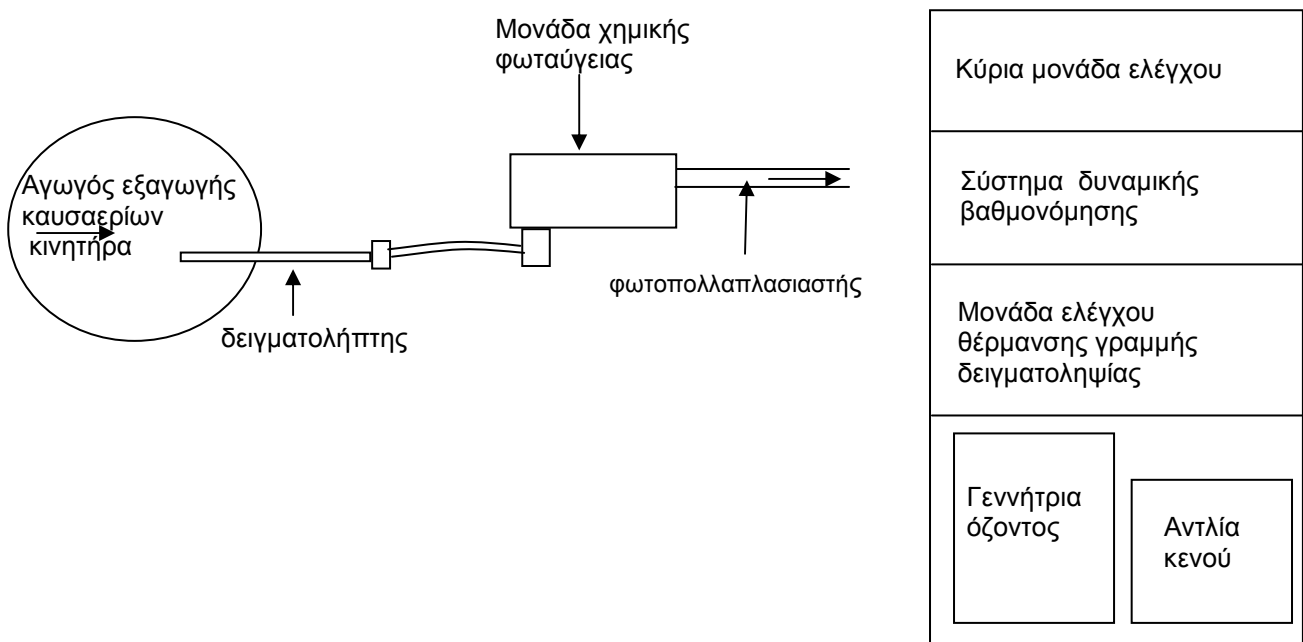
Σχήμα 1.1 – Σχηματική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας χημικής φωταύγειας

1.3 Επισκόπηση του αναλυτή fNOx 400 Fast CLD της CAMBUSTION

Η μελέτη που διεξήχθη στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, έγινε με χρήση του αναλυτή της Cambustion Ltd., του μοντέλου fNOx 400. Ο αναλυτής αυτός επιτυγχάνει πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης, της τάξεως των χιλιοστών του δευτερολέπτου (msec), και επιτρέπει τη μέτρηση της συγκέντρωσης σε NO στα καυσαέρια, σε ένα κύκλο λειτουργίας του κινητήρα. Ο συγκεκριμένος αναλυτής, βρίσκει εφαρμογή σε μικρούς τετράχρονους κινητήρες, οπότε και οι διαστάσεις σχεδίασής του δεν επαρκούν για εφαρμογή σε ναυτικούς κινητήρες. Λεπτομέρειες για τα τεχνικά του χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο παράρτημα 1.

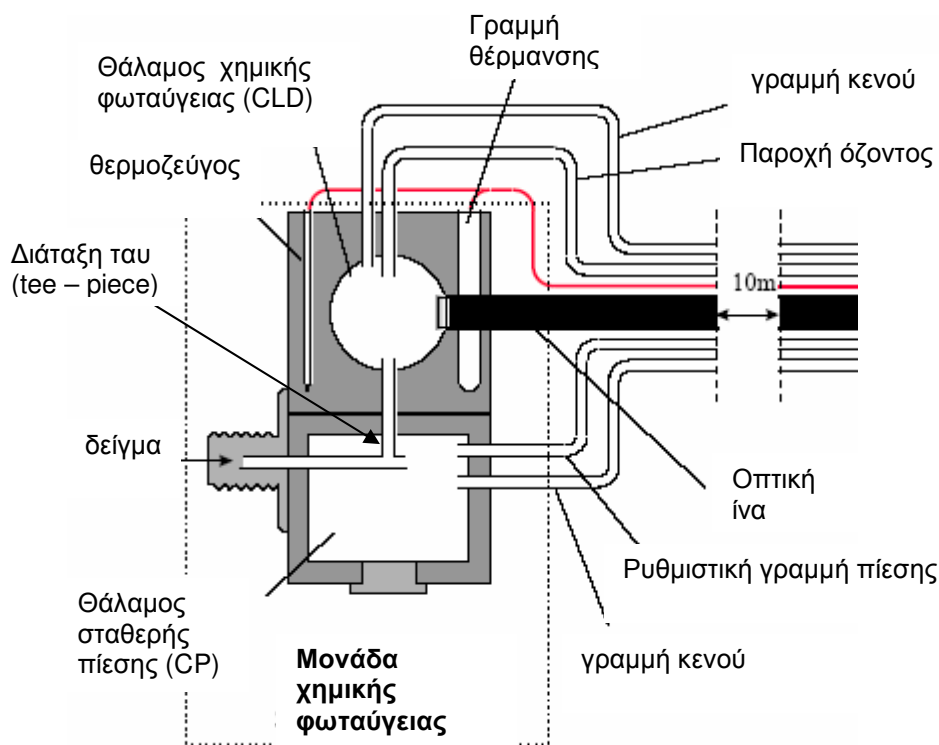
Τα κύρια μέρη που αποτελούν τον αναλυτή που φαίνεται στο παράρτημα 1 και στην αντίστοιχη σχηματική αναπαράσταση του σχήματος 1.2, είναι:

- Ο θερμαινόμενος δειγματολήπτης, που εισάγεται στο σύστημα εξαγωγής του κινητήρα.
- Ο θάλαμος χημικής φωταύγειας, που βρίσκεται προσαρτημένος στο τέλος του δειγματολήπτη με σκοπό την ελαχιστοποίηση της απόστασης που διανύει το δείγμα και συνεπώς τους χαμηλούς χρόνους απόκρισης.
- Η κύρια μονάδα λειτουργίας που επεξεργάζεται το εκπεμπόμενο σήμα και ρυθμίζει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους του συστήματος.



Σχήμα 1.2 – Σχηματική αναπαράσταση κύριων μονάδων λειτουργίας του μετρητικού συστήματος

Στο σχήμα 1.3 αναπαριστάται το σύστημα της χημικής φωταύγειας, όπου γίνεται η αντίδραση του αερίου με το όζον που παρέχεται από την κύρια μονάδα. [6]



Σχήμα 1.3 – Σχηματικό διάγραμμα της μονάδας χημικής φωταύγειας

Το πίσω άκρο του δειγματολήπτη συνδέεται με το θάλαμο χημικής φωταύγειας (CLD) μέσω ενός ενδιάμεσου θαλάμου, σταθερής πίεσης (CP) . Ο θάλαμος αυτός προδιαγράφεται να λειτουργεί σε πίεση -350mmHg αναφορικά με την ατμοσφαιρική πίεση, με σκοπό να αναρροφά απαραίτητη ποσότητα δείγματος και ταυτόχρονα να εξαλείφει τυχόν διακυμάνσεις της πίεσης του αερίου, που προέρχονται από το σύστημα εξαγωγής του κινητήρα. Έτσι επιτυγχάνεται σταθερή παροχή όγκου αερίου μέσω αγωγού σε διάταξη ταυ (tee - piece), στο θάλαμο χημικής φωταύγειας. Ο θάλαμος σταθερής πίεσης ρυθμίζει αρκετά χαμηλά την πίεση του δείγματος που καταλήγει τελικά στο θάλαμο χημικής φωταύγειας, ο οποίος προδιαγράφεται να λειτουργεί σε πίεση χαμηλότερη από 30mmHg . Επομένως, ο θάλαμος σταθερής πίεσης εξασφαλίζει την σταθερή λειτουργία του θαλάμου αντίδρασης, ανεξάρτητα από την πίεση εισόδου του αερίου στο δειγματολήπτη. Αποτέλεσμα της σταθερής διαφοράς πίεσης μεταξύ των δύο θαλάμων, είναι η σταθερή ροή δείγματος προς το θάλαμο χημικής φωταύγειας.

1.4 Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος

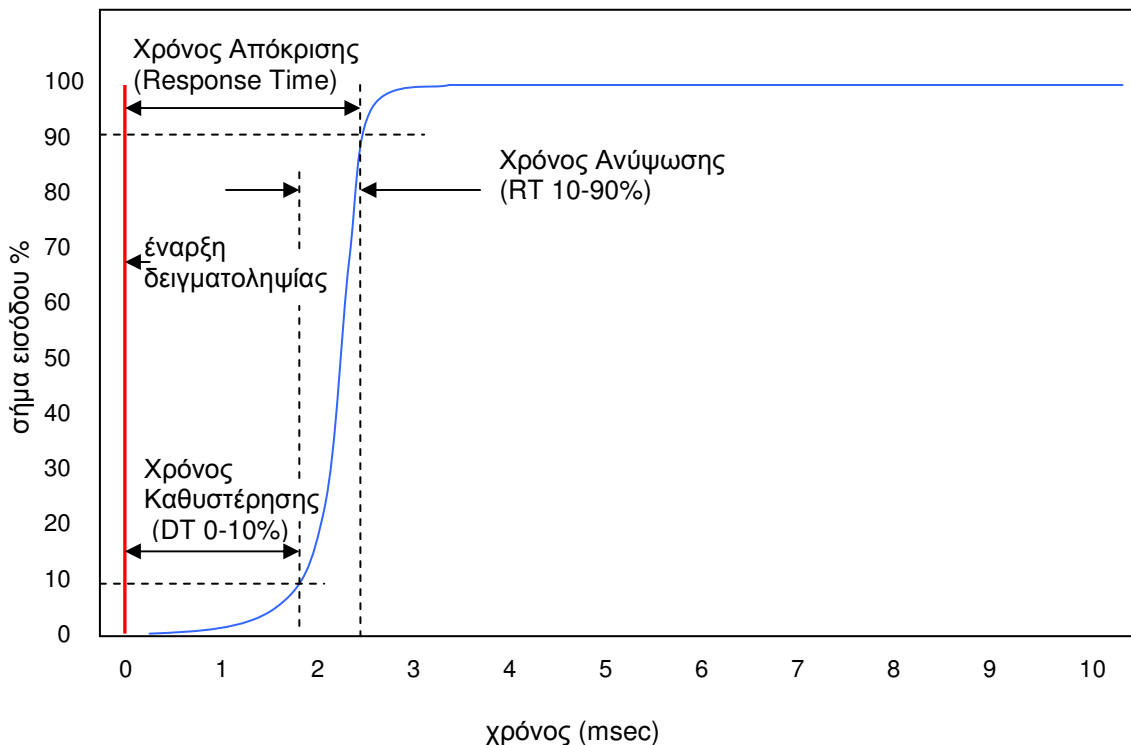
Ένα τυπικό μετρητικό σύστημα μετατρέπει μια φυσική ποσότητα / μέγεθος σε ηλεκτρονικό σήμα. Η ακρίβεια του αποτελέσματος, ο χρόνος απόκρισης και άλλοι παράγοντες καθορίζουν την απόδοση του μετρητικού συστήματος.

Κάθε μετρητικό σύστημα παρουσιάζει ένα χρόνο απόκρισης (Response Time), ο οποίος χωρίζεται σε δύο τμήματα, το χρόνο καθυστέρησης και το χρόνο ανύψωσης. Οι χρονικές αυτές παράμετροι φαίνονται στο σχήμα 1.4.

Ο *χρόνος καθυστέρησης* (Delay Time, DT), είναι το διάστημα από τη στιγμή που το δείγμα προς μέτρηση εισέρχεται στο σύστημα έως ότου η ένδειξη της μέτρησης να αντιστοιχεί στο 10% της μέγιστης τιμής της μέτρησης.

Ο *χρόνος ανύψωσης* (Rise Time, RT), ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα για να δώσει την ένδειξη που αντιστοιχεί στο 90% της μέγιστης τιμής του εισερχόμενου σήματος, μετρούμενος από το 10% της τιμής αυτής.

Στην παρούσα μελέτη, οι αλλαγές που έγιναν στο μετρητικό σύστημα (δηλ. το δειγματολήπτη της Cambustion), επηρέασαν μόνο το χρόνο απόκρισης, οπότε αυτή η παράμετρος και εξετάστηκε.

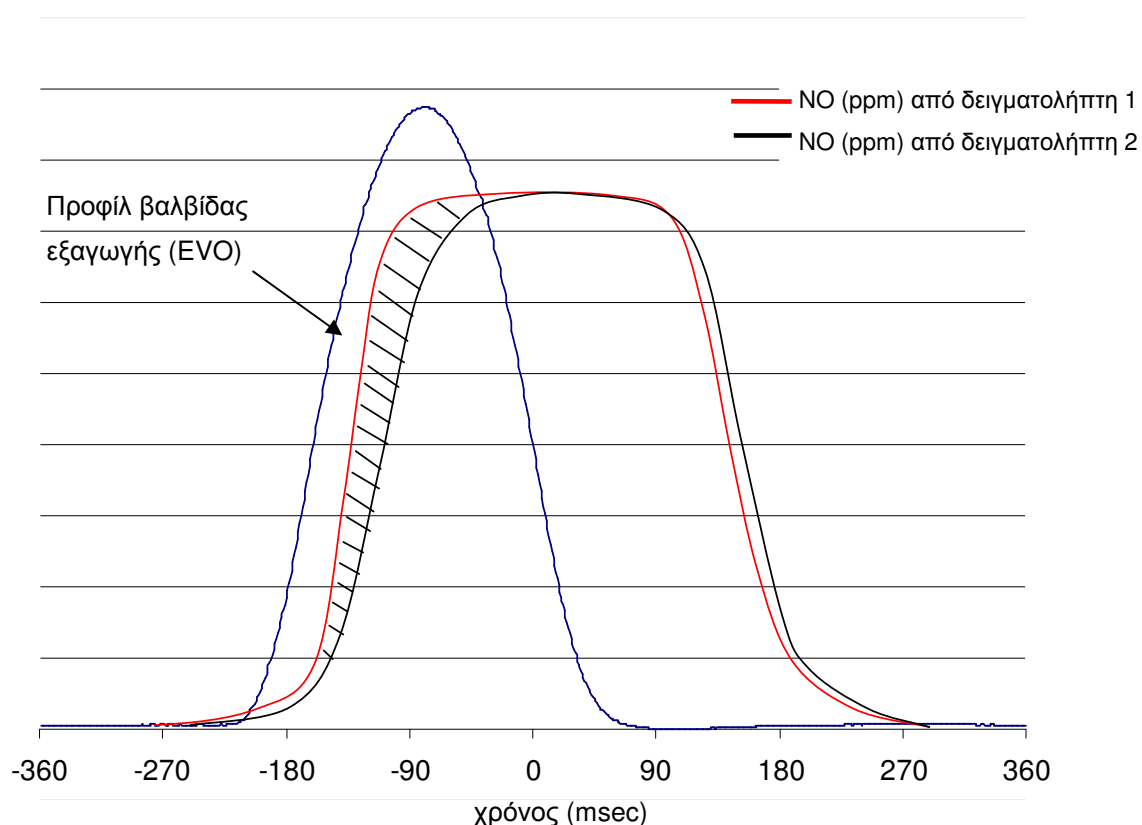


Σχήμα 1.4 - Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος

Στο μετρητικό σύστημα υπό εξέταση, ο χρόνος απόκρισης επηρεάζεται άμεσα από την απόσταση που πρέπει να διανύσει το αέριο μέσα στο δειγματολήπτη, για να φτάσει στο θάλαμο χημικής φωταύγειας. Όσο αυξάνεται αυτή η απόσταση, αυξάνεται και ο χρόνος απόκρισης του συστήματος.

Από το σχήμα 1.4 φαίνεται ότι ο χρόνος καθυστέρησης (DT), καθορίζει τη στιγμή της έναρξης της μέτρησης από το μετρητικό σύστημα και πόσο αυτό έχει καθυστερήσει σε σχέση με την πραγματική στιγμή της έναρξης της δειγματοληψίας. Ο χρόνος ανύψωσης (RT), καθορίζεται ουσιαστικά από την κλίση της καμπύλης και συνδέεται άμεσα με την ποιότητα της μέτρησης.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, μικρότεροι χρόνοι ανύψωσης παρέχουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Αυτό συμβαίνει διότι το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από την καμπύλη, αντιστοιχεί στην συνολική ποσότητα εκπεμπόμενων NO από το συγκεκριμένο κύλινδρο που γίνεται η μέτρηση, σε ένα κύκλο λειτουργίας. Συνεπώς, αν η κλίση της καμπύλης είναι απότομη (πλησιέστερη στο κάθετο), συμπεραίνεται ότι, ο υπολογισμός του εμβαδού που περικλείεται ανάμεσα στο ίχνος των NO και τον άξονα x'x (τον άξονα του χρόνου) με μεθόδους ολοκλήρωσης, δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα και τιμές πολύ κοντά στις πραγματικές. Αντίθετα αν η κλίση της καμπύλης είναι μικρή, τότε ένα μεγάλο μέρος του εμβαδού που αντιστοιχεί σε ποσότητα εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου, δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Στο σχήμα 1.5, φαίνονται δύο καμπύλες NO, από δύο διαφορετικούς δειγματολήπτες με διαφορετικούς χρόνους ανύψωσης.

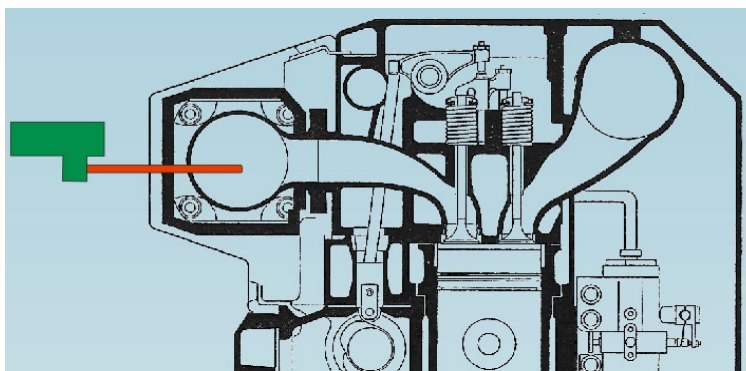


Σχήμα 1.5 - Καμπύλες NO με δειγματολήπτες διαφορετικής απόκρισης

Ο δειγματολήπτης 1 (κόκκινη καμπύλη) έχει καλύτερη απόκριση από τον δειγματολήπτη 2 (μαύρη καμπύλη), όπως φαίνεται από την κλίση των δύο καμπυλών. Το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν αντιστοιχεί στην ποσότητα των NO που 'χάνονται' στην μέτρηση με το δειγματολήπτη 2, λόγω του μεγαλύτερου χρόνου ανύψωσης (RT). Η ποσότητα αυτή, των οξειδίων που παραλείπονται, δεν μπορεί να υπολογιστεί και για το λόγο αυτό, ο χρόνος ανύψωσης είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος αναφορικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων.

1.5 Στόχος διπλωματικής εργασίας

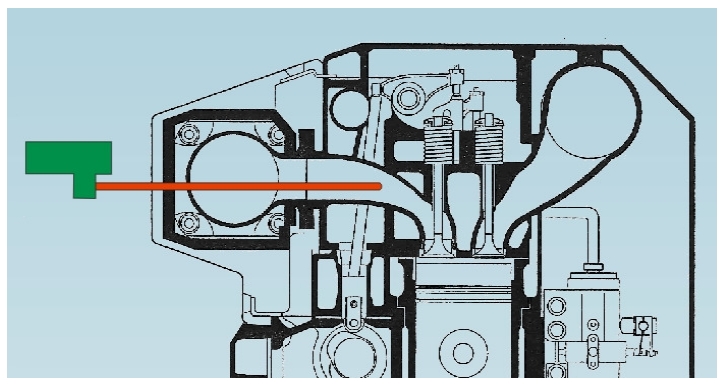
Ο πρότυπος δειγματολήπτης, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή, έχει μήκος 150mm. Η θέση αυτού του δειγματολήπτη στο σύστημα εξαγωγής ενός ναυτικού κινητήρα, όπου οι διαστάσεις των εξαρτημάτων είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές ενός τυπικού κινητήρα οχημάτων, είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 – Θέση πρότυπου δειγματολήπτη μήκους 150mm

Στη θέση αυτή, ο δειγματολήπτης δεν έχει τη δυνατότητα αναρρόφησης δείγματος καυσαερίων από συγκεκριμένο κύλινδρο, αλλά αντιθέτως, αναρροφά δείγμα καυσαερίων στην πολλαπλή εξαγωγή, που προέρχεται από όλους τους κυλίνδρους του κινητήρα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στόχος ήταν η τοποθέτησή του δειγματολήπτη πίσω από τη βαλβίδα εξαγωγής συγκεκριμένου κυλίνδρου, με σκοπό τη μέτρηση των οξειδίων του αζώτου, από τον συγκεκριμένο κύλινδρο, σε ένα κύκλο λειτουργίας του κινητήρα. Στο σχήμα 1.7 αναπαριστάται η προσδοκώμενη θέση του εκτεταμένου δειγματολήπτη.



Σχήμα 1.7 – Θέση εκτεταμένου δειγματολήπτη πίσω από τη βαλβίδα εξαγωγής

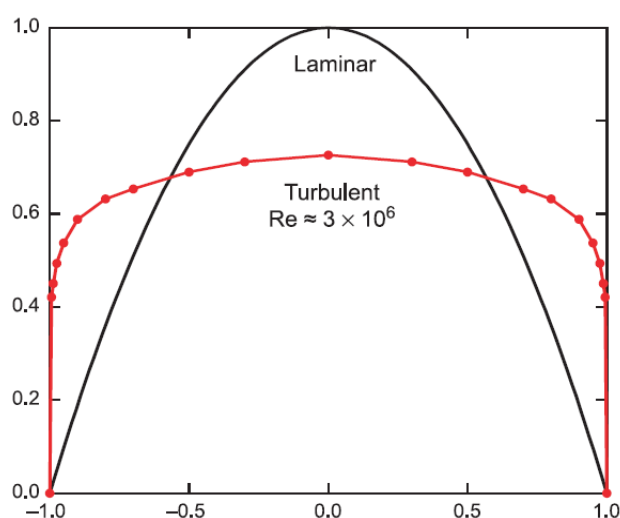
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ

Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται θεωρητική ανάλυση της ροής στο εσωτερικό του δειγματολήπτη με χρήση αρχών της Μηχανικής Ρευστών και αναπτύσσεται το υπολογιστικό μοντέλο με το οποίο διερευνώνται διαφορετικές εσωτερικές διάμετροι, μήκη και υλικά δειγματολήπτη. Με τη χρήση κατάλληλων εξισώσεων που αφορούν σε δύο δεξαμενές συνδεδεμένες με αγωγό μεγάλου μήκους και σταθερής διατομής γίνεται προσομοίωση της ροής των αερίων από τον αγωγό εξαγωγής καυσαερίων του κινητήρα, διαμέσου του δειγματολήπτη, που καταλήγουν μέσα στον θάλαμο σταθερής πίεσης του συστήματος χημικής φωταύγειας.

Η παρούσα θεωρητική ανάλυση διεξήχθη με σκοπό μια αρχική εκτίμηση του βέλτιστου λόγου μήκους προς διάμετρο του δειγματολήπτη, λαμβάνοντας υπ' όψη την επίδραση της τριβής στο εσωτερικό του δειγματολήπτη. Σημαντική παράμετρος προς εξέταση της παρούσας θεωρητικής ανάλυσης, ήταν η ανάπτυξη τυρβώδους ροής (οπότε και υψηλοί αριθμοί Reynolds) στο εσωτερικό του δειγματολήπτη για να επιτευχθούν οι χαμηλοί χρόνοι δειγματοληψίας και μέτρησης.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα προφίλ των ταχυτήτων ρευστού, υπό συγκεκριμένη πίεση, που ρέει σε ευθύγραμμο αγωγό, σταθερής διατομής. Το προφίλ της ταχύτητας σε τυχαία διατομή του αγωγού, για στρωτή ροή, παρουσιάζει ομαλή καμπυλότητα (μαύρη γραμμή) σε σύγκριση με τις πολύ απότομες αλλαγές της καμπυλότητας κοντά στα τοιχώματα (κόκκινη γραμμή), που αντιστοιχούν στην τυρβώδη ροή. Αυτές οι απότομες αλλαγές της κλίσης είναι ανάλογες της αντίστασης που αντιμετωπίζει η ροή στο εσωτερικό του αγωγού, και έχουν σαν αποτέλεσμα τη γρήγορη διάχυση της ροής [6].



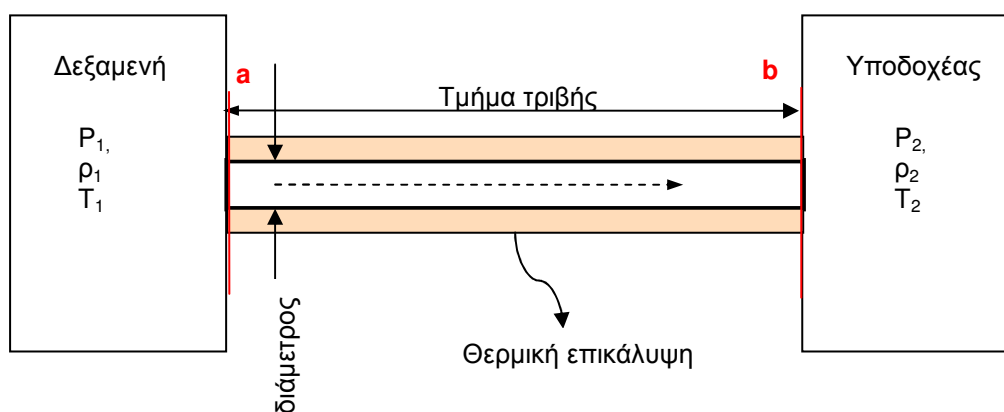
Σχήμα 2.1 – Προφίλ ταχυτήτων ρευστού για στρωτή και τυρβώδη ροή, υπό σταθερή πίεση, σε αγωγό κυκλικής διατομής

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του μετρητικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή, ο χρόνος απόκρισης του μετρητικού μηχανήματος επηρεάζεται άμεσα από την ταχύτητα διάχυσης του αερίου από τα τοιχώματα προς το κέντρο του αγωγού. Η πολλαπλή διάχυση της ροής που εμφανίζει η τυρβώδης ροή, καθιστά δυνατή την ανάμειξη του αερίου αρκετά γρήγορα, ενώ η στρωτή ροή, με παραβολικό προφίλ ταχυτήτων, παράγει πολύ πιο αργά την ίδια διάχυση της ροής [7].

Για το λόγο αυτό, βασικός στόχος της διαστασιολόγησης του δειγματολήπτη, ήταν να επιλεγθούν κατάλληλες διαστάσεις ώστε να επιτυγχάνονται αρκετά υψηλοί αριθμοί Reynolds στο εσωτερικό του αγωγού και να αντιστοιχούν κατά το δυνατόν σε μεταβατική ή τυρβώδη ροή. Προσεγγίζοντας το μοντέλο που μελετήθηκε μέσω απλών εξισώσεων της μηχανικής των ρευστών, έγινε δυνατός ο υπολογισμός του αριθμού Reynolds, συναρτήσε των διαστάσεων του αγωγού και των συνθηκών δειγματοληψίας. Στις ακόλουθες παραγράφους παρουσιάζεται η προσέγγιση αυτή.

2.1 Ισόθερμη ροή σε αγωγό σταθερής διατομής

Το σύστημα δειγματοληψίας που αναπτύχθηκε μπορεί να αναπαρασταθεί από 2 δεξαμενές που βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες και επικοινωνούν με ευθύγραμμο αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2. Ο αγωγός εξαγωγής καυσαερίων μπορεί να θεωρηθεί ως δεξαμενή αερίου σταθερών συνθηκών για στοιχειώδη μεταβολή του χρόνου. Όμοια ο θάλαμος σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας που βρίσκεται στο πίσω μέρος του δειγματολήπτη μπορεί να θεωρηθεί ως υποδοχέας σταθερών συνθηκών. Ο δειγματολήπτης λόγω του μεγάλου λόγου του μήκους προς τη διάμετρο αυτού προσομοιάζεται με αγωγό μεγάλου μήκους και σταθερής διατομής. Σε τέτοιους αγωγούς που συνδέουν δύο δεξαμενές διαφορετικών συνθηκών, η ροή ρευστού μπορεί να θεωρηθεί ισόθερμη με τριβές, που συνοδεύεται από ροή θερμότητας από το ρευστό στο περιβάλλον μέσω των τοιχωμάτων του αγωγού (σχήμα 2.2). Η ροή θερμότητας είναι τόση όση χρειάζεται για να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία του ρευστού και με αυτήν την παραδοχή οι μεταβολές στην πυκνότητα, την πίεση και την ταχύτητα μπορούν να υπολογιστούν από βασικές εξισώσεις. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού χρήσιμων παραμέτρων της ροής.



Σχήμα 2.2 - Ισόθερμη ροή με τριβές

2.1.1 Εξίσωση διατήρησης της μηχανικής ενέργειας

Η μονοδιάστατη εξίσωση της ενέργειας για δυναμική ροή (εξίσωση Bernoulli χωρίς τριβή) στην γενικευμένη της μορφή είναι:

$$\frac{d(u^2 / 2)}{dx} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dx} + g \frac{dZ}{dx} = 0 \quad (2.1)$$

Η εξίσωση Bernoulli (εξ. 2.1) για ασυμπιεστή ροή μεταξύ δύο διατομών (a και b), διορθωμένη για τις επιδράσεις της τριβής [8], γράφεται :

$$\frac{P_a}{\rho} + g \cdot Z_a + \frac{\alpha_a \cdot \bar{V}_a^2}{2} = \frac{P_b}{\rho} + g \cdot Z_b + \frac{\alpha_b \cdot \bar{V}_b^2}{2} + h_f \quad (2.2)$$

όπου:

$P_{a,b}$ η πίεση του ρευστού (στις διατομές a, b) (N/m^2)

ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec^2)

$Z_{a,b}$ το ύψος πάνω από το επίπεδο αναφοράς (στις διατομές a, b) (m)

$\bar{V}_{a,b}$ η μέση ταχύτητα του ρευστού (στις διατομές a, b) (m/sec)

h_f η απώλεια λόγω τριβής (ανάμεσα στις διατομές a, b) (J/kg)

α παράγοντας διόρθωσης της κινητικής ενέργειας (αδιάστατος)

Οι δείκτες a, b αναφέρονται στις διατομές a, b όπως αναγράφονται στο σχήμα 2.2.

Η εξίσωση (2.1) μπορεί να εφαρμοστεί σε στοιχειώδες μήκος του αγωγού και να γραφεί σε διαφορική μορφή ως εξής:

$$\frac{dP}{\rho} + d \left(\frac{\alpha \cdot \bar{V}^2}{2} \right) + g \cdot dZ + dh_f = 0 \quad (2.3)$$

Με τις ακόλουθες παραδοχές, η εξίσωση 2.3 απλοποιείται στην πιο κάτω μορφή (εξ. 2.4):

-Σταθερή, μονοδιάστατη ροή

-Οι διαβαθμίσεις της ταχύτητας u του ρευστού μέσα σε μία διατομή αγνοούνται ($\alpha=\beta=1$) και

$$\bar{V} = u$$

-Η τριβή περιορίζεται στη διάτμηση του τοιχώματος

-Το αξονικό έργο είναι ίσο με το μηδέν

-Οι επιδράσεις της βαρύτητας είναι αμελητέες και η μηχανική δυναμική ενέργεια δεν λαμβάνεται υπ' όψη

-Το ρευστό είναι ιδανικό αέριο με σταθερή ειδική θερμότητα

Εάν θεωρηθεί, για λόγους συμβολισμού, στο υπόλοιπο της παρούσας ανάλυσης ότι

$\bar{V} = V$ και παραλείποντας τους όρους της δυναμικής ενέργειας, σημειώνοντας ότι $\alpha=1$, θα έχουμε:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + dh_{fs} = 0 \quad (2.4)$$

όπου h_{fs} η απώλεια λόγω επιδερμικής τριβής.

Η επιδερμική τριβή για το στοιχειώδες μήκος του αγωγού δίνεται από την εξίσωση [8] :

$$dh_{fs} = \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\tau_w}{r_w} \cdot dL \Rightarrow dh_{fs} = \frac{4 \cdot f}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot dL \Rightarrow dh_{fs} = \frac{2 \cdot f}{D} \cdot V^2 \cdot dL \quad (2.5)$$

και ολοκληρώνοντας παίρνουμε για όλο το μήκος του αγωγού L έχουμε:

$$h_{fs} = \frac{2 \cdot f \cdot L}{D} \cdot V^2 \quad (2.6)$$

όπου,

τ_w η διατμητική τάση στο τοίχωμα (N/m^2)

r_w η ακτίνα του αγωγού (m)

L το μήκος του αγωγού (m)

f ο συντελεστής τριβής Fanning (αδιάστατος)

D η διάμετρος του αγωγού (m)

Αντικαθιστώντας την εξ.2.5 στην εξ.2.4, προκύπτει ότι το ισοζύγιο της μηχανικής ενέργειας για συμπιεστή ροή γράφεται:

$$\frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + \frac{4 \cdot f}{D} \cdot \frac{V^2}{2} \cdot dL = 0 \quad (2.7)$$

2.1.2 Εξίσωση συνέχειας

Η στοιχειώδης μεταβολή της παροχής μάζας για στοιχειώδη μεταβολή της διατομής περιγράφεται από την γενική εξίσωση της συνέχειας [8] :

$$d\dot{m} = \rho \cdot V \cdot dA \quad (2.8)$$

όπου,

- \dot{m} η παροχή μάζας ($\frac{kg}{sec}$)

- A το εμβαδόν της διατομής του αγωγού (m^2)

- ρ η πυκνότητα του ρευστού ($\frac{kg}{m^3}$)

- V η ταχύτητα του ρευστού ($\frac{m}{sec}$)

Για να διαφοριστεί, η εξίσωση γράφεται σε λογαριθμική μορφή:

$$\ln \rho + \ln A + \ln V = const \quad (2.9)$$

Με τη διαφορίση της σχέσης αυτής:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dA}{A} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (2.10)$$

Για σταθερή επιφάνεια διατομής (A), η εξίσωση της συνέχειας τελικά γίνεται:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (2.11)$$

2.1.3 Υπολογισμός παροχής μάζας

Πολλαπλασιάζοντας το ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας που προέκυψε από την εξίσωση 2.7 με ρ^2 προκύπτει:

$$\rho \cdot dp + \rho^2 \cdot V \cdot dV + \rho^2 \cdot \frac{V^2}{2} \cdot \frac{4 \cdot f}{D} \cdot dL = 0 \quad (2.12)$$

Επειδή όμως μαζική ταχύτητα G (ή ταχύτητα μάζας) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [8]:

$$G = \rho \cdot V \quad (2.13)$$

και με τη βοήθεια της καταστατικής εξίσωσης των τέλειων αερίων:

$$\rho = \frac{Mp \cdot p}{R \cdot T} \quad (2.14)$$

Επιπλέον η εξίσωση της συνέχειας (εξ. 2.11) με τη βοήθεια της εξ. 2.13 τροποποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \Rightarrow \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} \Rightarrow \frac{V^2}{\rho} d\rho = -V \cdot dV \Rightarrow V \cdot dV = -\frac{V^2}{\rho} d\rho = -\frac{G^2}{\rho^3} d\rho \Rightarrow \\ V \cdot dV = -(G^2 \cdot \rho^{-3}) d\rho \end{aligned} \quad (2.15)$$

όπου:

- G η μαζική ταχύτητα ($\frac{kg}{sec \cdot m^2}$)

- Mp το μοριακό βάρος

- R η παγκόσμια σταθερά των αερίων ($\frac{J}{K \cdot kg \cdot mol}$)

- T η θερμοκρασία του ρευστού (K)

Η εξίσωση 2.12 διαμορφώνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.14 και 2.15 ως εξής:

$$\frac{Mp}{R \cdot T} \cdot p d\rho - G^2 \frac{d\rho}{\rho} + \rho^2 \cdot \frac{2 \cdot f}{D} \cdot V^2 dL = 0 \quad (2.16)$$

Ολοκληρώνοντας ανάμεσα στις θέσεις a , b και σύμφωνα με τη σχέση 2.13 προκύπτει:

$$\frac{Mp}{2 \cdot R \cdot T} (p_b^2 - p_a^2) - G^2 \cdot \ln \frac{\rho_b}{\rho_a} + G^2 \cdot \frac{2 \cdot f \cdot L}{D} = 0 \quad (2.17)$$

Εφόσον θεωρείται ότι η θερμοκρασία του ρευστού διατηρείται σταθερή, αντικαθιστώντας το

λόγο των πυκνοτήτων $\left(\frac{\rho_b}{\rho_a}\right)$ με το λόγο των πιέσεων $\left(\frac{p_b}{p_a}\right)$, η εξ.2.17 γίνεται:

$$\frac{Mp}{2 \cdot R \cdot T} (p_b^2 - p_a^2) - G^2 \cdot \ln \frac{p_b}{p_a} + G^2 \cdot \frac{2 \cdot f \cdot L}{D} = 0$$

$$\Rightarrow p_a^2 - p_b^2 = \frac{G^2 \cdot R \cdot T}{Mp} \left[2 \ln \frac{p_a}{p_b} + \frac{4 \cdot f \cdot L}{D} \right] \quad (2.18)$$

Από την καταστατική εξίσωση όμως προκύπτει : $T = \frac{p_a}{\rho_a \cdot \left(\frac{R}{Mp}\right)}$

Η σχέση 2.18 μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η μεταβολή της θερμοκρασίας στο αγωγό είναι μικρή, όπως άλλωστε έχει διευκρινιστεί εξ' αρχής για την συγκεκριμένη εφαρμογή, και σ' αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέση τιμή της θερμοκρασίας στη θέση του T. Επιπρόσθετα, η εξ. 2.18 εμφανίζει μεγάλη ακρίβεια για μικρούς αριθμούς Mach όταν εφαρμόζεται σε αδιαβατική ροή.

Έτσι η εξίσωση (2.18) αντικαθιστώντας την θερμοκρασία από την παραπάνω καταστατική εξίσωση και λυμένη ως προς το τετράγωνο της μαζικής ταχύτητας, γράφεται:

$$G^2 = \frac{(p_a^2 - p_b^2) \cdot \rho_a}{p_a \cdot \left(\frac{4 \cdot f \cdot L}{D} + 2 \ln \frac{p_a}{p_b} \right)} \quad (2.19)$$

Η παροχή μάζας από τη σχέση 2.8 και τη σχέση ορισμού της μαζικής ταχύτητας ($G = \rho \cdot V$) δίνεται ως:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A$$

Με χρήση της σχέσης 2.19 για τη μαζική ταχύτητα, υπολογίζεται τελικά η παροχή μάζας:

$$\dot{m} = \sqrt{G^2} \cdot A \quad (2.20)$$

2.1.4 Αριθμός Reynolds και μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή

Ο ορισμός του αριθμού Reynolds δείχνει ότι η κρίσιμη ταχύτητα, στην οποία η ροή μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη, εξαρτάται από τέσσερα μεγέθη:

- τη διάμετρο του αγωγού (D) (m)
- το ιξώδες του ρευστού (μ) ($Pa \cdot sec$)
- την πυκνότητα (ρ) ($\frac{kg}{m^3}$) και
- τη μέση γραμμική ταχύτητα (V) ($\frac{m}{sec}$)

και ορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad (2.21)$$

Ο ακόλουθος πίνακας [8] δίνει ενδεικτικές τιμές για τη σχέση του αριθμού Reynolds και του τύπου της ροής.

Reynolds	Τύπος ροής
< 2100	στρωτή
2100 - 4000	μεταβατική
> 4000	τυρβώδης

Πίνακας 2.1 - Τύπος ροής συναρτήσει αριθμού Reynolds

2.1.5 Ο παράγοντας της τριβής

Η τριβή είναι καθοριστική παράμετρος στη μελέτη της τυρβώδους ροής και στις ακόλουθες παραγράφους εισάγεται στους υπολογισμούς του αριθμού Reynolds.

Γενικά, αυξανόμενου του συντελεστή τριβής, μειώνεται η ταχύτητα του ρευστού και συνεπώς και ο αριθμός Reynolds. Επομένως, η τριβή που αναπτύσσεται στα τοιχώματα του αγωγού είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή.

Ο συντελεστής τριβής Fanning, ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής τάσης του τοιχώματος, προς το γινόμενο της πυκνότητας και του μανομετρικού ύψους της ταχύτητας ($V^2/2$) [8].

$$f \equiv \frac{\tau_w}{\rho \cdot V^2 / 2} \quad (2.22)$$

Όπου f ο συντελεστής τριβής Fanning (αδιάστατος)

τ_w η διατμητική τάση στο τοίχωμα (N/m^2)

ρ η πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

V η ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

2.1.6 Σχέσεις ανάμεσα στις παραμέτρους της επιδερμικής τριβής (skin friction)

Οι τέσσερις παράμετροι ($h_{fs}, \Delta p_s, \tau_w, f$) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιδερμικής τριβής σε αγωγούς, συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση [8] :

$$h_{fs} = \frac{2 \cdot \tau_w}{\rho \cdot r_w} \cdot L = \frac{\Delta p_s}{\rho} = 4f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (2.23)$$

όπου ο δείκτης s χρησιμοποιείται στις παραμέτρους που σχετίζονται μόνο με την επιδερμική τριβή και ο παράγοντας f αναφέρεται στον συντελεστή τριβής κατά Fanning. Αν εμφανίζονται και άλλοι όροι από την εξίσωση Bernoulli, ή αν υπάρχει τριβή μορφής (form friction, τριβή λόγω της μορφολογίας του αγωγού), οι παράμετροι αυτές διαφέρουν.

Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται γενικότερα από την ποσότητα:

$$f \cdot \frac{L}{r_H} \quad (2.24)$$

όπου r_H η υδραυλική ακτίνα και στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου έχουμε κυκλική διατομή η υδραυλική ακτίνα ισούται με $D/4$, όπου D η εσωτερική διάμετρος του αγωγού.

Συνεπώς, ο συντελεστής επιδερμικής τριβής συναρτήσει της διαμέτρου αγωγού κυκλικής διατομής, είναι ανάλογος της ποσότητας:

$$4 \cdot f \cdot \frac{L}{D} \quad (2.25)$$

2.1.7 Ο συντελεστής τριβής Fanning

Οι ενεργειακές απώλειες που οφείλονται στην τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στο ρευστό και τα τοιχώματα του σωλήνα που διαρρέει, υπολογίζονται από την εξίσωση Darcy – Weisbach [9] :

$$h_f = f_{moody} \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.26)$$

Όπου

h_f η απώλεια λόγω τριβής (J/kg)

L το μήκος του αγωγού (m)

D η διάμετρος του αγωγού (m)

V η ταχύτητα του ρευστού (m/sec)

g_c η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec^2) και

f_{moody} ο συντελεστής τριβής *Moody* (αδιάστατος)

f_{Darcy} ο συντελεστής τριβής *Darcy* (αδιάστατος)

Στην εξίσωση 2.26, ο συντελεστής τριβής *Moody* (ή *Darcy*), δίνεται από την εξίσωση [9]:

$$f_{moody} = f_{Darcy} = \frac{D}{L} \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.27)$$

Ο συντελεστής τριβής Fanning δίνεται από την εξίσωση [9]:

$$f_{fanning} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \Rightarrow f_{fanning} = \frac{1}{4} \frac{D}{L} \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.28)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις 2.27 και 2.28 κατά μέλη καταλήγουμε στη συσχέτιση που συνδέει τον συντελεστή τριβής Fanning και Moody [9] :

$$f_{moody} = 4 \cdot f_{fanning} \quad (2.29)$$

Οι δύο συντελεστές τριβής εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds και τη σχετική τραχύτητα του υλικού του αγωγού (e/D) :

$$f_{moody / fanning} = f(Re, e/D) \quad (2.30)$$

Τραχύτητα (e) ορίζεται το μέσο μέγεθος των κυρτωμάτων της επιφάνειας ενός υλικού, στην προκειμένη περίπτωση, στο εσωτερικό τοίχωμα του αγωγού. Η τραχύτητα εξαρτάται από το υλικό και το είδος της κατεργασίας του.

Σχετική τραχύτητα (e/D) είναι η τραχύτητα (όπως ορίστηκε προηγουμένως) σε σύγκριση με τη διάμετρο του αγωγού. Λείοι σωλήνες θεωρούνται ότι έχουν μηδενική τραχύτητα.

Η τραχύτητα για διάφορα υλικά προσδιορίζεται πειραματικά. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται μερικές ενδεικτικές τιμές [10].

υλικό	τραχύτητα – (e) $\times 10^{-3}m$
Copper, Lead, Brass, Aluminum(new)	0.001-0.002
PVC and plastic pipes	0.0015-0.007
Epoxy, Vinyl Ester and Isophthalic pipe	0.005
Stainless steel	0.0008
Steel commercial pipe	0.045-0.09
Stretched steel	0.015
Weld steel	0.045
Galvanized steel	0.15
Rusted steel (corrosion)	0.15-4.00
New cast iron	0.25-0.80
Warm cast iron	0.80-1.50
Rusty cast iron	1.5-2.5
Sheet or asphalted cast iron	0.010-0.0015
Smoothed cement	0.3
Ordinary concrete	0.3-1.0
Coarse concrete	0.3-5.0
Well planed wood	0.18-0.90
Ordinary wood	0.18-0.90
Quartz glass	0.000002

Πίνακας 2.2 - Ενδεικτικές τιμές επιφανειακής τραχύτητας διαφόρων υλικών

Στη στρωτή ροή όπου ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από 2100, ο συντελεστής τριβής Moody υπολογίζεται από την εξίσωση Hagen-Poiseuille [9] :

$$f_{moody} = \frac{64}{Re} \quad (2.31)$$

Στην τυρβώδη ροή όπου ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από 4000, ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από την εξίσωση των Colebrook- White, με επαναληπτική διαδικασία [9] :

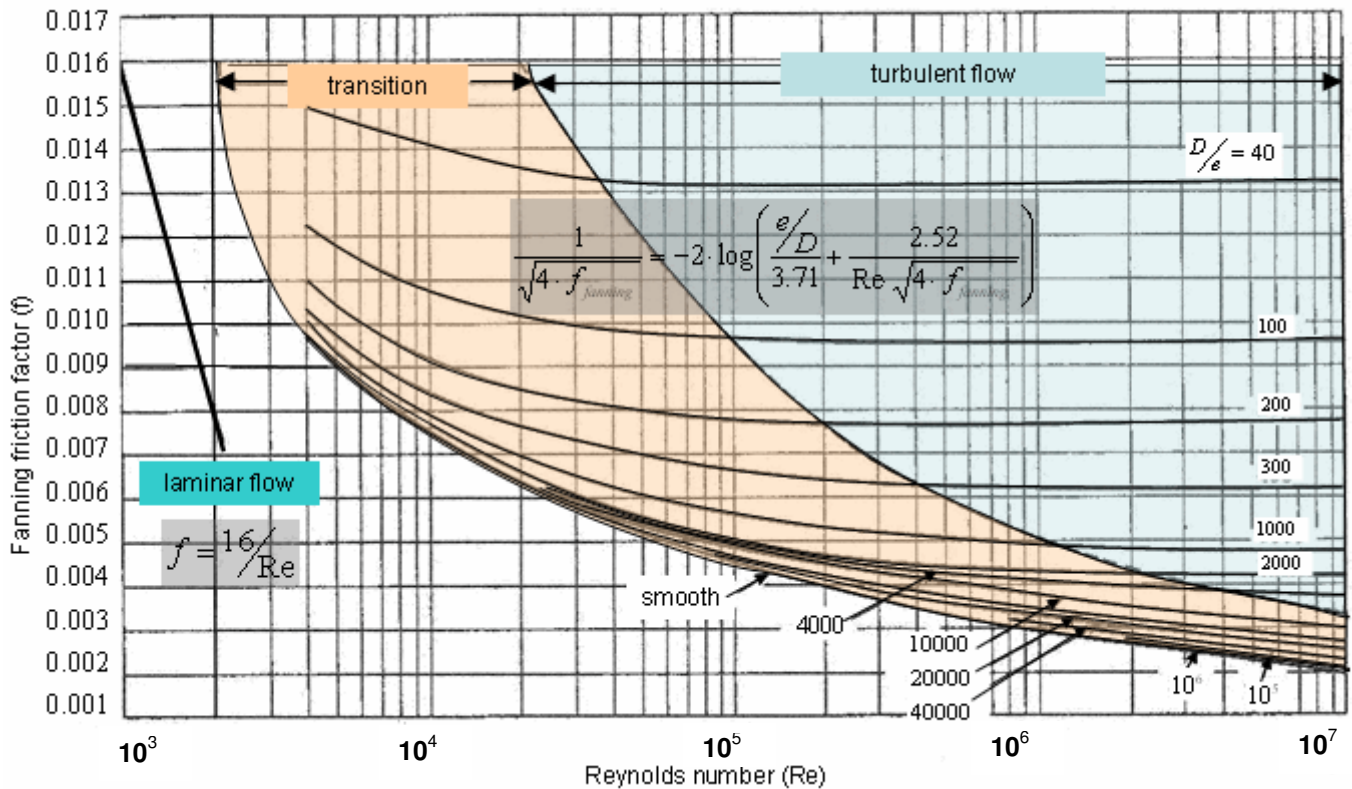
$$\frac{1}{\sqrt{f_{moody}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{e/D}{3.71} + \frac{2.52}{Re \cdot \sqrt{f_{moody}}} \right) \quad (2.32)$$

Για τη μεταβατική περιοχή ($2100 < \text{Reynolds} < 4000$) χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Colebrook - White (2.32) η οποία λαμβάνει υπόψη τη σχετική τραχύτητα του υλικού κατασκευής του δειγματολήπτη.

Σε κάθε περίπτωση, για τον υπολογισμό του συντελεστή κατά Fanning, γίνεται χρήση της σχέσης συσχετισμού (εξ.2.29): $f_{moody} = 4 \cdot f_{fanning}$

2.1.8 Το διάγραμμα Fanning

Το διάγραμμα Fanning δίνει τη δυνατότητα γραφικού προσδιορισμού του συντελεστή τριβής συναρτήσει του αριθμού Reynolds και της σχετικής τραχύτητας.



Σχήμα 2.3 - Το διάγραμμα Fanning

Το διάγραμμα του σχήματος 2.3 παρέχει πληροφορίες για μία από τις τρεις παραμέτρους που περιέχει, υπό την προϋπόθεση ότι οι άλλες δύο είναι γνωστές. Στην περίπτωση όπου πρέπει να προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής (f) Fanning και ο αριθμός Reynolds, με δεδομένο μόνο το λόγο D/e , γίνεται χρήση της εξίσωσης 2.32 και 2.29. Η εξίσωση αυτή, για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής Fanning, γράφεται ως:

$$\frac{1}{\sqrt{4 \cdot f_{fanning}}} = -2 \cdot \log \left(\frac{e/D}{3.71} + \frac{2.52}{Re \cdot \sqrt{4 \cdot f_{fanning}}} \right) \quad (2.33)$$

Η σχέση 2.33 επιλύεται με επαναληπτική μέθοδο για δεδομένη τιμή του λόγου e/D και αρχικές τιμές για τον συντελεστή τριβής $f_{fanning}$ και τον αριθμό Reynolds.

2.1.9 Αριθμός Mach

Η ροή σε ένα αγωγό σταθερής διατομής είναι στραγγαλισμένη (choked flow) όταν ο αριθμός Mach στην έξοδο του αγωγού ισούται με τη μονάδα ($M=1$), και τότε περαιτέρω μείωση της πίεσης στην έξοδο δεν αυξάνει τη παροχή μάζας. Γενικά, η ροή στραγγαλίζεται εάν μειωθεί σημαντικά η πίεση στην έξοδο του αγωγού ή εάν αυξηθεί σημαντικά το μήκος του αγωγού. Η υποηχητική ροή (subsonic flow: $Ma < 1$) δεν μπορεί να μετατραπεί σε υπερηχητική (supersonic flow $Ma > 1$) μέσα στον αγωγό, αλλά μόνο σε ηχητική (sonic flow $Ma = 1$) στην έξοδο του αγωγού. Όμοια, η υπερηχητική ροή δεν μπορεί να μετατραπεί σε υποηχητική περνώντας από την ηχητική κατάσταση ($M=1$). Για να αποφευχθούν υπολογισμοί που δεν υφίστανται και αφορούν σε μετάβαση από υποηχητική σε υπερηχητική ροή ή αντίστροφα, πρέπει να γίνεται έλεγχος του αριθμού Mach [12].

Ο αριθμός Mach προσδιορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του ρευστού (V), προς την ταχύτητα του ήχου (a) στο ρευστό αυτό, στις συνθήκες του ρευστού (πίεση, θερμοκρασία).

$$Ma \equiv \frac{V}{a} \quad (2.34)$$

Ο αριθμός Mach γίνεται μονάδα όταν η ταχύτητα του ρευστού είναι ίδια με εκείνη του ήχου στο συγκεκριμένο ρευστό, υπό τις ίδιες συνθήκες (πίεση, θερμοκρασία). Ανάλογα με την τιμή του Mach η ροή χαρακτηρίζεται υποηχητική ($Ma < 1$), ηχητική ($Ma = 1$) ή υπερηχητική ($Ma > 1$).

Για ιδανικά αέρια, η ακουστική ταχύτητα είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας και ο υπολογισμός του αριθμού Mach γίνεται από την εξίσωση 2.34 [8] :

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{\gamma \cdot \frac{R}{Mp} \cdot T}} \quad (2.35)$$

2.1.10 Κινηματικό και δυναμικό ιξώδες καυσαερίων

Σε πραγματικά ρευστά, οι εφαιπόμενες των δυνάμεων τριβής εξαρτώνται από το ιξώδες του ρευστού. Το δυναμικό ιξώδες (μ) είναι χαρακτηριστικό κάθε ρευστού και εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία. Υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [11] :

$$\mu_{exh} = 1.384 \cdot 10^{-5} + 2.68 \cdot 10^{-8} \cdot T_{exh} \quad (2.36)$$

όπου:

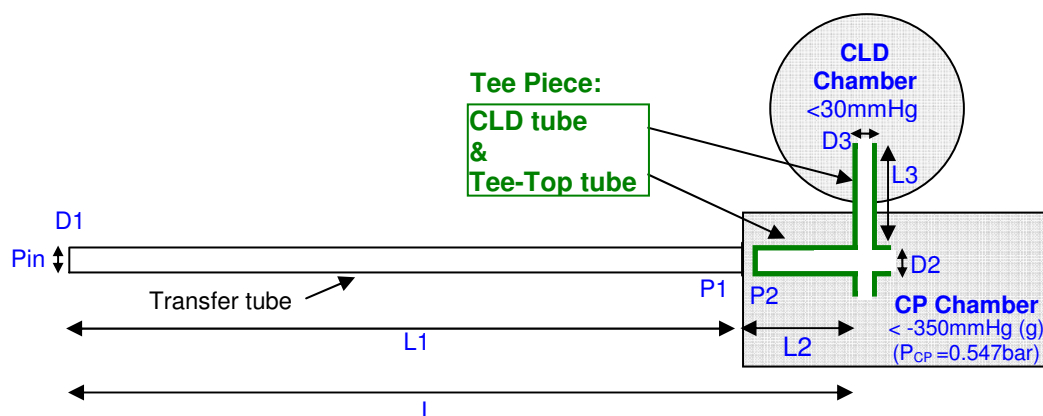
T_{exh} η θερμοκρασία καυσαερίων (K)

Στη δυναμική των ρευστών, όπου δυνάμεις τριβής και αδράνειας αλληλεπιδρούν, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπ' όψη το κινηματικό ιξώδες (ν), ο λόγος δηλαδή του δυναμικού ιξώδους (μ) προς την πυκνότητα του αερίου (ρ).

$$\nu_{exh} = \frac{\mu_{exh}}{\rho} \quad (2.37)$$

2.2 Ανάλυση ροής στο δειγματολήπτη

Με χρήση της θεωρίας των προηγούμενων παραγράφων, αναπτύχθηκε μία μέθοδος για τον προσδιορισμό του αριθμού Reynolds, επομένως και του τύπου της ροής στο εσωτερικό του δειγματολήπτη. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε αγωγούς διαφορετικών διαστάσεων (L, d) και διαφορετικού υλικού (διαφορετικής επιφανειακής τραχύτητας). Για τον προσδιορισμό της σχετικής τραχύτητας γίνεται χρήση της εξίσωσης Colebrook-White (παράγραφος 2.1.7). Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της διάταξης του δειγματολήπτη (δηλ. ο αγωγός, ο θάλαμος σταθερής πίεσης (CP chamber) και ο θάλαμος χημικής φωταύγειας (CLD chamber)).



Διαστάσεις T-Piece:

Tee-Top tube: $L_2 = 24\text{mm}$, $D_2 = 1.17\text{mm}$ και CLD-tube: $L_3 = 35\text{mm}$, $D_3 = 0.254\text{mm}$

Σχήμα 2.4 – Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης

Στην μελέτη αυτή έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές για απλοποίηση των υπολογισμών:

- Το μήκος του δειγματολήπτη ($L_1 = 550\text{-}650\text{mm}$), είναι αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο του Tee- Piece ($L_2 = 24\text{mm}$), επομένως στους υπολογισμούς που ακολουθούν ως ολικό μήκος (L) από το κανάλι εξαγωγής καυσαερίων μέχρι το θάλαμο σταθερής πίεσης (CP chamber), θα λαμβάνεται το μήκος του δειγματολήπτη.
- Η αλλαγή στη διάμετρο από τη διάμετρο του δειγματολήπτη (D_1), σε εκείνη του tee – top (D_2) δεν λαμβάνεται υπ' όψη στους υπολογισμούς.
- Η πίεση εισόδου των καυσαερίων (P_i) θεωρήθηκε εκείνη στον αγωγό εξαγωγής καυσαερίων για τα διάφορα φορτία. Μελετήθηκαν τρία ενδεικτικά φορτία του κινητήρα, φορτίο 50% με πίεση καυσαερίων 2bar, φορτίο 75% με πίεση καυσαερίων 3bar και φορτίο 90% με πίεση καυσαερίων 3.5bar .
- Η πίεση στην έξοδο θεωρήθηκε εκείνη του θαλάμου σταθερής πίεσης (CP) και ίση με 0.547bar.
- Η μετάβαση του αερίου από την είσοδο στην έξοδο του δειγματολήπτη γίνεται ισοθερμοκρασιακά και ως σταθερή θερμοκρασία θεωρήθηκε η θερμοκρασία του πρότυπου δειγματολήπτη, η οποία ρυθμίζεται με κατάλληλη διάταξη στους $T_c = 150^\circ\text{C}$.

2.2.1 Περιγραφή υπολογισμών

Η απαιτούμενη παροχή όγκου του μετρητικού συστήματος για τις τρεις πιέσεις που μελετήθηκαν αναφορικά με τον πρότυπο δειγματολήπτη, μήκους $L = 150\text{mm}$, παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίεση εισόδου αερίου (bar)	Απαιτούμενη παροχή όγκου στην έξοδο(cc/sec)
2	200
3	320
3.5	385

Πίνακας 2.3– Απαιτούμενη παροχή όγκου για τον πρότυπο δειγματολήπτη

Η ογκομετρική παροχή που δίνεται από τον κατασκευαστή για το μήκος (150mm) και τη διάμετρο (0.66mm) του πρότυπου δειγματολήπτη, για τις τρεις διαφορετικές πιέσεις εισόδου (τρία ενδεικτικά φορτία), για να προσαρμοστεί σε νέο μήκος δειγματολήπτη, πολλαπλασιάστηκε σε κάθε περίπτωση με τον λόγο των μηκών του πρότυπου ($L = 150\text{mm}$) προς το εκάστοτε μήκος του εξεταζόμενου δειγματολήπτη. Ακόμη, επειδή οι παροχές που φαίνονται στον πίνακα 2.3 συμπεριλαμβάνουν την επίδραση της τριβής για $L = 150\text{mm}$, η ταχύτητα εξόδου του αερίου διορθώθηκε για το νέο μήκος, με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 2.2.2.

Η ογκομετρική παροχή στην έξοδο του δειγματολήπτη \dot{V}_{exit} δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{V}_{exit} = u_{exit} \cdot A \quad (2.38)$$

από την οποία και υπολογίζεται μία πρώτη εκτίμηση της ταχύτητας εξόδου των καυσαερίων:

$$u_{exit} = \frac{\dot{V}_{exit}}{A} \quad (2.39)$$

Δεδομένων των συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα, η ροή στην είσοδο θα είναι σε κάθε περίπτωση υποηχητική, επομένως, ο αριθμός Mach στην έξοδο θα παίρνει μέγιστη τιμή την μονάδα (ηχητική ροή). Για το λόγο αυτό γίνεται έλεγχος του αριθμού Mach στην έξοδο με βάση την ταχύτητα που υπολογίστηκε και αν η τιμή του υπερβαίνει τη μονάδα, διορθώνεται και υπολογίζεται η μέγιστη ταχύτητα εξόδου που είναι αυτή που αντιστοιχεί σε στραγγαλισμό της ροής ($Ma = 1$).

Ο αριθμός Mach, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.9, δίνεται από τη σχέση:

$$Ma_{exit} = \frac{u_{exit}}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_c}} \quad (2.40)$$

Σε περίπτωση που $Ma_{exit} = 1$, η ταχύτητα υπολογίζεται:

$$u_{exit} = u_{max} = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_c} \quad (2.41)$$

Με δεδομένες τις συνθήκες στον θάλαμο σταθερής πίεσης (CP) υπολογίζεται η πυκνότητα του αερίου στην έξοδο:

$$\rho_{exit} = \frac{P_{cp}}{R \cdot T_c} \quad (2.42)$$

Όμοια, υπολογίζεται η πυκνότητα του αερίου στην είσοδο:

$$\rho_{in} = \frac{P_{in}}{R \cdot T_c} \quad (2.43)$$

Με χρήση της εξίσωσης της συνέχειας κατά μήκος αγωγού σταθερής διατομής, ισχύει ότι:

$$\rho_{in} \cdot u_{in} = \rho_{exit} \cdot u_{exit} \quad (2.44)$$

Επομένως, η παροχή μάζας μπορεί να υπολογιστεί ακολούθως:

$$\dot{m} = u_{exit} \cdot A \cdot \rho_{exit} \quad (2.45)$$

Όπου το εμβαδόν της διατομής του αγωγού είναι :

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 \quad (2.46)$$

Το δυναμικό ιξώδες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία (εξ.2.36):

$$\mu = 1.384 \cdot 10^{-5} + 2.68 \cdot 10^{-8} \cdot T_c$$

Ο αριθμός Reynolds, όπως αναφέρθηκε, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (εξ.2.21):

$$Re = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

Μια αρχική εκτίμηση για τον αριθμό Reynolds με τη βοήθεια της εξ. 2.45 στο εσωτερικό του δειγματολήπτη γίνεται από τη σχέση (για $Ma_{exit}=1$ και χωρίς την επίδραση της τριβής):

$$Re = \frac{D \cdot \dot{m}}{A \cdot \mu} \quad (2.47)$$

2.2.2 Συντελεστής τριβής

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1.8, ο συντελεστής τριβής Fanning εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, τόσο στη στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή. Με την εξίσωση 2.47 υπολογίζεται μια αρχική τιμή του αριθμού Reynolds που δεν συμπεριλαμβάνει την επίδραση της τριβής. Για Reynolds > 2100 (μεταβατική και τυρβώδη περιοχή), γίνεται αρχική εκτίμηση του συντελεστή τριβής από την εξίσωση Darcy – Weisbach (εξ. 2.28), η οποία αναφέρεται σε ασυμπιεστή ροή ρευστού για δεδομένη πτώση πίεσης:

$$\Delta P = 4f \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \Rightarrow f = \frac{2 \cdot \Delta P \cdot D}{4 \cdot L \cdot \rho \cdot u^2} \quad (2.48)$$

Με τη διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως υπολογίζεται νέα τιμή του αριθμού Reynolds. Από το ισοζύγιο της μηχανικής ενέργειας (εξ. 2.19) και για θέση “a” λαμβάνεται ο αγωγός εξαγωγής των καυσαερίων (οπότε και η ένδειξη “in”) και για θέση “b” ο θάλαμος σταθερής πίεσης στο πίσω μέρος του δειγματολήπτη CP chamber (οπότε και η ένδειξη “CP”), προκύπτει η σχέση:

$$\frac{(P_{in}^2 - P_{cp}^2) \rho_{in}}{P_{in} \cdot G^2} = 4f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_{in}}{P_{cp}} \quad (2.49)$$

Πολλαπλασιάζοντας με την ποσότητα R·T και δεδομένου ότι $\rho_1 \cdot R \cdot T = p_1$, η εξίσωση 2.49 γράφεται:

$$\frac{(P_{in}^2 - P_{cp}^2)}{G^2} = R \cdot T \cdot \left(4f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_{in}}{P_{cp}} \right) \quad (2.50)$$

Από την εξίσωση 2.50, συμπεραίνεται ότι το τετράγωνο της μαζικής ταχύτητας G είναι:

$$G^2 = \frac{P_{in}^2 - P_{cp}^2}{R \cdot T \cdot \left(4f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_{in}}{P_{cp}} \right)} \quad (2.51)$$

Με χρήση της εξ. 2.51, γίνεται υπολογισμός νέας παροχής μάζας, στον οποίο λαμβάνεται υπ’ όψη και η παράμετρος της τριβής:

$$\dot{m} = A \cdot \sqrt{G^2} = A \cdot G \quad (2.47)$$

Ο νέος υπολογισμός του αριθμού Reynolds, γίνεται με χρήση της εξ. 2.47. Η τιμή αυτή εισάγεται στην εξίσωση Colebrook - White (εξ. 2.32) και γίνεται δεύτερη εκτίμηση του συντελεστή (f) Fanning. Η μέθοδος αυτή (δοκιμή και σφάλμα) επαναλαμβάνεται έως ότου ο αριθμός Reynolds και ο συντελεστής τριβής συγκλίνουν αντίστοιχα σε δύο τιμές του διαγράμματος (μία τιμή του Reynolds και μία τιμή του συντελεστή τριβής).

2.3 Αποτελέσματα θεωρητικής ανάλυσης

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, εφαρμόστηκε για τρία ενδεικτικά φορτία του κινητήρα, χαμηλό, μεσαίο και υψηλό. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, για τις διάφορες φορτίσεις παρέχονται δεδομένα από τον κατασκευαστή για την απαιτούμενη ογκομετρική παροχή στην έξοδο του δειγματολήπτη, στον θάλαμο σταθερής πίεσης (πίνακας 2.3). Με χρήση των δεδομένων αυτών για τρεις πιέσεις που ανταποκρίνονται σε τρία φορτία (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό) ενός κινητήρα και με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.2, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της μεταβολής τριών παραμέτρων, του μήκους, της διαμέτρου και του υλικού, στον τύπο της ροής. Οι υπολογισμοί αναπτύχθηκαν σε κώδικα Matlab για επιτάχυνση των πράξεων και των επαναληπτικών διαδικασιών (Παράρτημα 2).

2.3.1 Επίδραση μεταβολής μήκους δειγματολήπτη

Στον πίνακα 2.4 παρατίθενται συγκριτικά αποτελέσματα για τρεις χαλύβδινους δειγματολήπτες ίδιας εσωτερικής διαμέτρου και διαφορετικού μήκους. Εξετάστηκε η διάμετρος $D = 0.66\text{mm}$ και τα μήκη $L = 150\text{mm}$, καθώς και δύο μεγαλύτερα, $L = 500\text{ mm}$ και $L = 650\text{ mm}$, με στόχο να ανταποκρίνονται στην ζητούμενη εφαρμογή, δηλαδή, την μέτρηση στο σύστημα εξαγωγής ναυτικού κινητήρα.

Πίεση καυσαερίων (bar)	εσωτερική διάμετρος δειγματολήπτη 0.66mm			
	μήκος (mm)	Reynolds	Mach εξόδου	ταχύτητα εξόδου (m/sec)
2	150	4211	1	412.34
	500	2072	0.425	175.46
	650	1594	0.327	134.97
3	150	6505	1	412.34
	500	3744	0.68	280.75
	650	3262	0.524	215.96
3.5	150	7626	1	412.34
	500	4463	0.808	333.38
	650	3898	0.623	256.45

Πίνακας 2.4 – Συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδραση της μεταβολής του μήκους του δειγματολήπτη

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, με την αύξηση του μήκους παρατηρείται σημαντική μείωση του αριθμού Reynolds. Η μεγαλύτερη πίεση εισόδου αυξάνει τον αριθμό Reynolds στο εσωτερικό του δειγματολήπτη. Στα δύο μεγαλύτερα μήκη, παρατηρείται μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή μετά το δεύτερο φορτίο, γεγονός που αναμένεται να έχει σημαντική επίδραση στην ταχύτητα δειγματοληψίας.

2.3.2 Επίδραση μεταβολής εσωτερικής διαμέτρου δειγματολήπτη

Στη συνέχεια εξετάστηκαν πέντε περιπτώσεις δειγματοληπτών ίδιου μήκους και διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου. Όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή, εξετάστηκε η διάμετρος του πρότυπου δειγματολήπτη ($D=0.66\text{mm}$) και με σκοπό την διερεύνηση της μείωσης και της αύξησης αυτής, εξετάστηκαν δύο μικρότερες και δύο μεγαλύτερες. Το μήκος που επιλέχθηκε ήταν $L = 500\text{ mm}$.

Πίεση καυσαερίων (bar)	μήκος δειγματολήπτη 500mm			
	διάμετρος (mm)	Reynolds	Mach εξόδου	ταχύτητα εξόδου (m/sec)
2	0.30	568	1	412.34
	0.50	1428	0.74	305.73
	0.66	2072	0.425	175.46
	0.80	1709	0.289	119.42
	1.00	1367	0.185	76.43
3	0.30	951	1	412.34
	0.50	2337	1	412.34
	0.66	3744	0.68	280.75
	0.80	5149	0.434	179.14
	1.00	2051	0.278	114.65
3.5	0.30	1149	1	412.34
	0.50	2798	1	412.34
	0.66	4463	0.808	333.38
	0.80	6119	0.55	226.91
	1.00	3082	0.312	195.21

Πίνακας 2.5 – Συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του δειγματολήπτη

Από τον πίνακα 2.5 παρατηρείται ότι για σταθερό μήκος $L=150\text{mm}$, η διάμετρος $d = 0.66\text{mm}$, στη χαμηλή πίεση των 2bar, έδωσε τον υψηλότερο Reynolds, ο οποίος ήταν κοντά στη μεταβατική περιοχή (2100-4000). Αυξανόμενης όμως της πίεσης σε 3 και 3.5bar, η αμέσως μεγαλύτερη διάμετρος (0.8mm) έδωσε υψηλότερους Reynolds.

Η πιο πάνω ανάλυση δείχνει ότι για το μήκος των 500 mm και για πιέσεις, 2, 3 και 3.5 bar, οι καλύτερες διαμέτροι είναι οι $D = 0.66\text{mm}$ και $D = 0.80\text{ mm}$.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της διαμέτρου, εξετάστηκαν τα ίδια φορτία και για μήκος $L = 650 \text{ mm}$. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πίνακα 2.6.

Πίεση καυσαερίων (bar)	μήκος δειγματολήπτη 650mm			
	διάμετρος (mm)	Reynolds	Mach εξόδου	ταχύτητα εξόδου (m/sec)
2	0.30	484	1	412.34
	0.50	1229	0.57	235.18
	0.66	1594	0.327	134.97
	0.80	1315	0.222	91.86
	1.00	1052	0.142	58.79
3	0.30	958	1	412.34
	0.50	2024	0.855	352.76
	0.66	3262	0.491	202.46
	0.80	1972	0.334	137.8
	1.00	1578	0.214	88.19
3.5	0.30	986	1	412.34
	0.50	2428	1	412.34
	0.66	3898	0.623	256.45
	0.80	5374	0.423	174.55
	1.00	1998	0.27	111.71

Πίνακας 2.6 – Συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του δειγματολήπτη

Παρατηρείται ότι η διάμετρος $D = 0.66 \text{ mm}$ δίνει τους υψηλότερους αριθμούς Reynolds για τις πιέσεις καυσαερίων 2 και 3bar. Για την πίεση 3.5bar τον υψηλότερο Reynolds δίνει η διάμετρος $D = 0.80 \text{ mm}$.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τους πίνακες 2.5 και 2.6, παρατηρείται ότι από την αύξηση του μήκους από 500 σε 650mm, η τιμή του Reynolds γενικά μειώνεται για όλες τις διαμέτρους. Επίσης, γίνεται φανερό ότι για τις 5 διαφορετικές διαμέτρους που εξετάστηκαν, η αύξηση του μήκους και της πίεσης, μετατοπίζει τον μέγιστο Reynolds προς τη διάμετρο $D = 0.66 \text{ mm}$.

Αυτό πιθανώς να οφείλεται στον παράγοντα της τριβής $\left(4 \cdot f \cdot \frac{L}{D}\right)$. Η επίδραση αυτού απαιτεί περαιτέρω ανάλυση που δεν συμπεριλαμβάνεται στην παρούσα εργασία.

2.3.3 Επίδραση υλικού κατασκευής δειγματολήπτη

Το υλικό κατασκευής του δειγματολήπτη, καθορίζει την τραχύτητα της επιφάνειας στο εσωτερικό του αγωγού και επιδρά στον τύπο της ροής. Για την μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής τραχύτητας στον αριθμό Reynolds και κατ' επέκταση, στον τύπο της ροής, εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις δειγματοληπτών ίδιου μήκους και διαμέτρου, από διαφορετικό υλικό. Το υλικό κατασκευής του ενός δειγματολήπτη, θεωρήθηκε ο ανοξείδωτος χάλυβας και του δεύτερου, το πυριτικό γυαλί (quartz glass), υλικό με πολύ μικρή επιφανειακή τραχύτητα (σχεδόν λεία επιφάνεια). Εξετάστηκε η διάμετρος του πρότυπου δειγματολήπτη, $D=0.66\text{mm}$ και το μήκος επιλέχθηκε $L = 500\text{mm}$, όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή. Στον πίνακα 2.7 παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα για τους δύο δειγματολήπτες, στις τρεις πιέσεις που εξετάστηκαν και στις παραγράφους 2.3.1 και 2.3.2.

Πίεση καυσαερίων (bar)	μήκος $L = 500 \text{ mm}$ / διάμετρος $d = 0.66 \text{ mm}$			
	Υλικό κατασκευής	Reynolds	Mach εξόδου	ταχύτητα εξόδου (m/sec)
2	Stainless steel	2072	0.425	175.46
	Quartz glass	2072	0.425	175.46
3	Stainless steel	3744	0.68	280.75
	Quartz glass	3800	0.68	280.74
3.5	Stainless steel	4463	0.808	333.38
	Quartz glass	4538	0.819	337.77

Πίνακας 2.7 – Συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδραση του υλικού κατασκευής του δειγματολήπτη

Στην χαμηλή πίεση (2bar), η ροή είναι στρωτή και στις δύο περιπτώσεις και τα αποτελέσματα για τον αριθμό Reynolds, τον αριθμό Mach και την ταχύτητα του ρευστού στην έξοδο, ταυτίζονται. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα Fanning, ο συντελεστής τριβής για Reynolds μικρότερους από 2100, είναι ανεξάρτητος της επιφανειακής τραχύτητας (e).

Παρατηρείται ότι στις δύο μεγαλύτερες πιέσεις που εξετάστηκαν, το πυριτικό γυαλί έδωσε ελαφρώς υψηλότερους αριθμούς Reynolds από τους αντίστοιχους που είχαν υπολογιστεί στην προηγούμενη παράγραφο, για το χαλύβδινο δειγματολήπτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΠΤΗ

Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο σχεδιασμός όλων των απαραίτητων εξαρτημάτων για την κατασκευή δειγματοληπτών διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου, με βάση τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης (που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 2) αλλά και τους περιορισμούς που ορίζονται από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το σύστημα δειγματοληψίας (δηλαδή τη χρήση στο σύστημα εξαγωγής ενός ναυτικού κινητήρα).

Για την αύξηση του μήκους του πρότυπου δειγματολήπτη του συστήματος μέτρησης NO, χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες επεκτάσεις (stainless steel tubes) διαφορετικής διαμέτρου. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν τρία βοηθητικά εξαρτήματα στήριξης και σύνδεσης της επέκτασης και του πρότυπου δειγματολήπτη. Η τελική συναρμογή του πρότυπου δειγματολήπτη, της επέκτασης και των εξαρτημάτων στήριξης και σύνδεσης, πραγματοποιείται με τη χρήση ενός αγωγού στήριξης, ο οποίος έχει και ρόλο “προστατευτικού” περιβλήματος της όλης συναρμογής από τους κραδασμούς.

3.1 Επιλογή κατασκευαστικών και σχεδιαστικών παραμέτρων

Ο σχεδιασμός της νέας μετρητικής διάταξης είχε τρεις βασικούς περιορισμούς:

- Οι μεγάλες διαστάσεις των αγωγών εξαγωγής καυσαερίων, δίχρονων και τετράχρονων ναυτικών κινητήρων, ορίζουν ένα ελάχιστο απαιτούμενο μήκος για το δειγματολήπτη, προκειμένου το άκρο εισρόφησης να πλησιάζει, μέσω του αγωγού, πίσω από την βαλβίδα εξαγωγής ενός συγκεκριμένου κυλίνδρου.
- Ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε ναυτικό κινητήρα προσδιορίζει και διαφορετική ποσότητα παραπροϊόντων καύσης (π.χ. σωματιδίων αιθάλης). Σε κάθε περίπτωση, η διατομή του αγωγού θα πρέπει να εξασφαλίζει την καλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος μέτρησης για δεδομένο χρονικό διάστημα, χωρίς να προκαλείται φραγμός της ροής και συνεπώς ανεπαρκής εισρόφηση καυσαερίων κατά τη διάρκεια μιας μέτρησης.
- Κατά την διάρκεια μετρήσεων ρύπων σε ναυτικούς κινητήρες, τα διάφορα εξαρτήματα του μετρητικού συστήματος που μελετήθηκε, υπόκεινται σε κραδασμούς που προκαλούνται από τη λειτουργία του κινητήρα. Συνεπώς, το υλικό κατασκευής του δειγματολήπτη, πρέπει να είναι τέτοιο που να αντέχει τους κραδασμούς και ταυτόχρονα να παρουσιάζει καλές θερμικές ιδιότητες.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, σχεδιάστηκαν έξι δειγματολήπτες, συνολικού μήκους 650mm και με υλικό κατασκευής, τον ανοξείδωτο χάλυβα. Οι διάμετροι επιλέχθηκαν με βάση την αρχική διάμετρο του κατασκευαστή (0.66mm), και συμπεριλαμβανομένου αυτής, κατασκευάστηκαν επιπρόσθετα δύο δειγματολήπτες μικρότερης (0.3, 0.5mm) και τρεις μεγαλύτερης (0.8, 1.0 και 1,2mm) διαμέτρου, για να εκτιμηθεί και πειραματικά η επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου στις κρίσιμες χρονικές παραμέτρους.

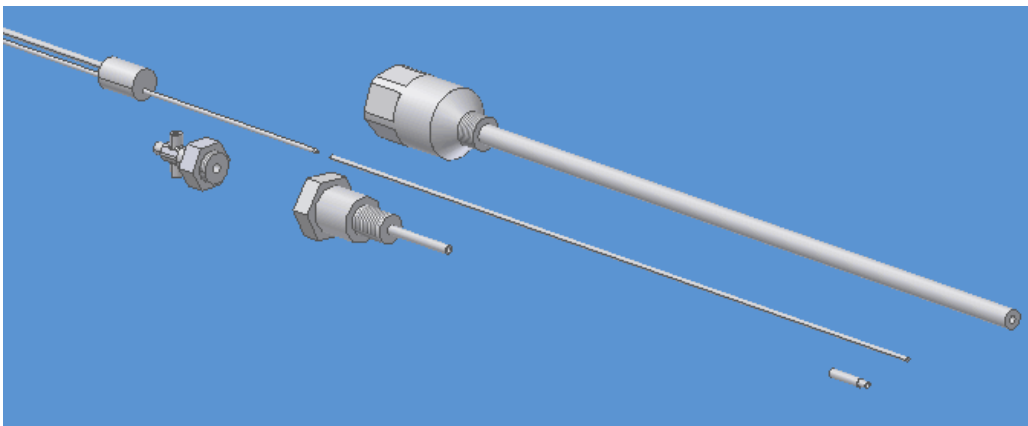
Το γενικό μοντέλο σχεδιάστηκε με βάση τον ακόλουθο συλλογισμό:

- Σχεδιασμός και κατασκευή επεκτάσεων, μήκους 500mm και διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου, με στόχο την συναρμογή της κάθε επέκτασης με τον πρότυπο δειγματολήπτη, μήκους 150mm. Στόχος ήταν η αξιολόγηση της μεταβολής της διαμέτρου δειγματοληψίας.
- Σχεδιασμός και κατασκευή κατάλληλου εξωτερικού αγωγού στήριξης, στο εσωτερικό του οποίου γινόταν η ένωση των δύο δειγματοληπτών. Ο αγωγός αυτός καθιστούσε δυνατή τη συναρμογή των δύο μερών και επιπλέον, προστάτευε το δειγματολήπτη από τις δυσμενείς συνθήκες στο εσωτερικό του αγωγού καυσαερίων του κινητήρα.
- Σχεδιασμός και κατασκευή βοηθητικών εξαρτημάτων για την υλοποίηση του γενικού μοντέλου.

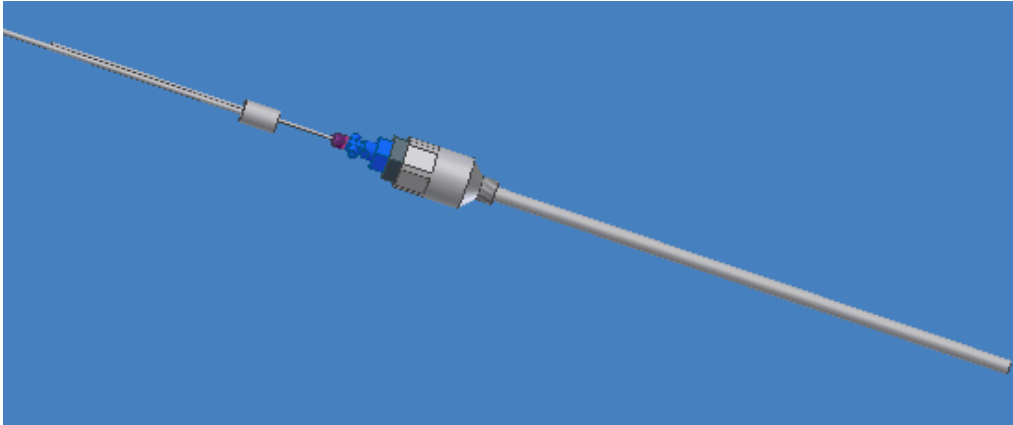
Βασικός περιορισμός ήταν η λειτουργικότητα της κατασκευής, η εύκολη και γρήγορη αλλαγή των επεκτάσεων. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με τον παραπάνω συλλογισμό, ώστε να είναι πρακτικό, σε πρώτη φάση, ως προς τις πειραματικές δοκιμές, οι οποίες αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό της βέλτιστης διαμέτρου και σε επόμενο στάδιο, να παρουσιάζει ευκολία στο χειρισμό, δηλαδή, σε περίπτωση φραγμού της ροής από σωματίδια αιθάλης, να μπορεί να γίνει αντικατάσταση της επέκτασης μόνο και όχι ολόκληρου του δειγματολήπτη, σε σύντομο χρονικό διάστημα και με χαμηλό κόστος.

Ο σχεδιασμός του δειγματολήπτη έγινε στο γραφικό περιβάλλον της Autodesk , στο Inventor 10. Τα τεχνικά σχέδια για κάθε μέρος της κατασκευής του μοντέλου και των εξαρτημάτων που δόθηκαν στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου για τις κατασκευές, διατίθενται στο παράρτημα 3. Το Inventor 10, εκτός από τον λεπτομερή σχεδιασμό των εξαρτημάτων, δίνει τη δυνατότητα της εικονικής συναρμολόγησης όλων των μερών, για έλεγχο της λειτουργικότητας και προσδιορισμό των απαιτούμενων εξαρτημάτων για την τελική υλοποίηση της εφαρμογής.

Στο σχήμα 3.1α φαίνεται τρισδιάστατη απεικόνιση του αποσυναρμολογημένου μοντέλου, με όλα τα μέρη που το αποτελούν, ενώ στο σχήμα 3.1β, παρουσιάζεται το μοντέλο συναρμολογημένο.



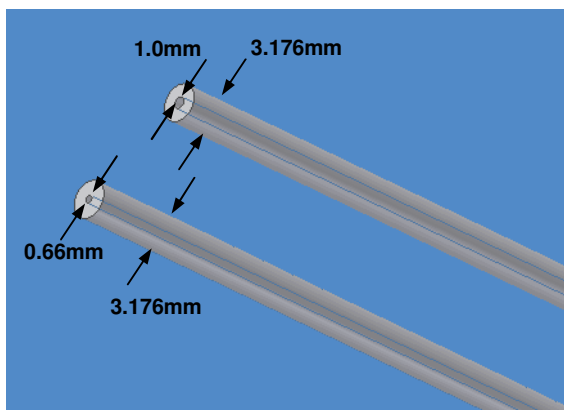
Σχήμα 3.1α – Τρισδιάστατη απεικόνιση δειγματολήπτη (σε εξάρμωση)



Σχήμα 3.1β – Τρισδιάστατη απεικόνιση δειγματολήτη (σε άρμωση)

3.2 Σχεδιασμός επεκτάσεων δειγματοληψίας

Οι επεκτάσεις που κατασκευάστηκαν για την υλοποίηση του μοντέλου, είχαν το ίδιο μήκος (500mm), την ίδια εξωτερική διάμετρο (3.176mm), το ίδιο υλικό (ανοξείδωτος χάλυβας), αλλά διαφορετικές εσωτερικές διαμέτρους (0.3, 0.5, 0.66, 0.8, 1.0 και 1.2mm). Η εξωτερική διάμετρος που επιλέχθηκε ήταν εκείνη του πρότυπου δειγματολήτη (3.176mm), ώστε με κατάλληλες διατάξεις, να είναι δυνατή η κεντρική ένωση των δύο. Οι έξι επεκτάσεις που σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν από την Cambustion Ltd, την κατασκευάστρια εταιρεία του πρότυπου δειγματολήτη. Μετά την παραλαβή έγιναν κάποιες τελικές τροποποιήσεις στις επεκτάσεις, στο μηχανουργείο του Εργαστηρίου. Στο σχήμα 3.2α απεικονίζονται δύο από τις έξι επεκτάσεις, στο περιβάλλον της Autodesk, όπως σχεδιάστηκαν, ενώ στο 3.2β παρουσιάζονται οι έξι επεκτάσεις που κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 3.2α – Τρισδιάστατη απεικόνιση των άκρων 2 επεκτάσεων

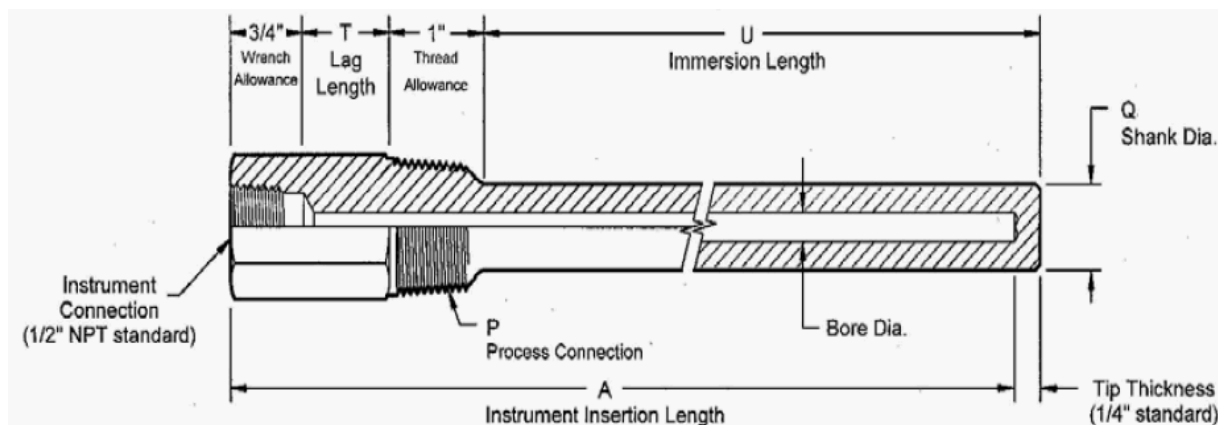


Σχήμα 3.2β – Οι 6 επεκτάσεις, εσωτερικών διαμέτρων 0.3, 0.5, 0.66, 0.8, 1.0 και 1.2 mm

3.3 Επιλογή διαστάσεων και σχεδιασμός εξωτερικού αγωγού στήριξης

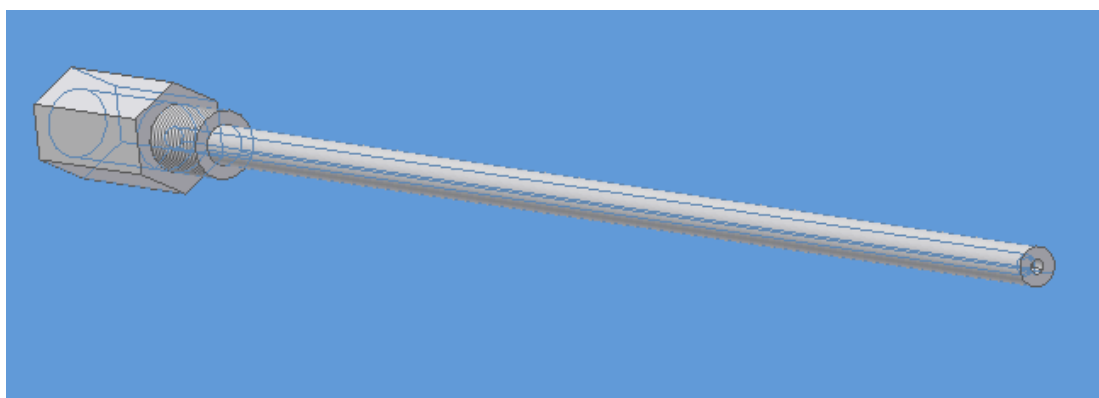
Ο εξωτερικός αγωγός στήριξης που χρειάστηκε τόσο για την συναρμογή των δύο δειγματοληπτών, όσο και για την προστασία αυτών, παραγγέλθηκε από την Texas Thermowell Industries. Απαιτήθηκε λεπτομερής σχεδιασμός του αγωγού με σκοπό να επιλεγούν οι πιο λειτουργικές, για την ζητούμενη εφαρμογή, διαστάσεις.

Στο σχήμα 3.3 φαίνονται οι διάφορες παράμετροι που έπρεπε να προσδιοριστούν για να γίνει η τελική επιλογή του μοντέλου.

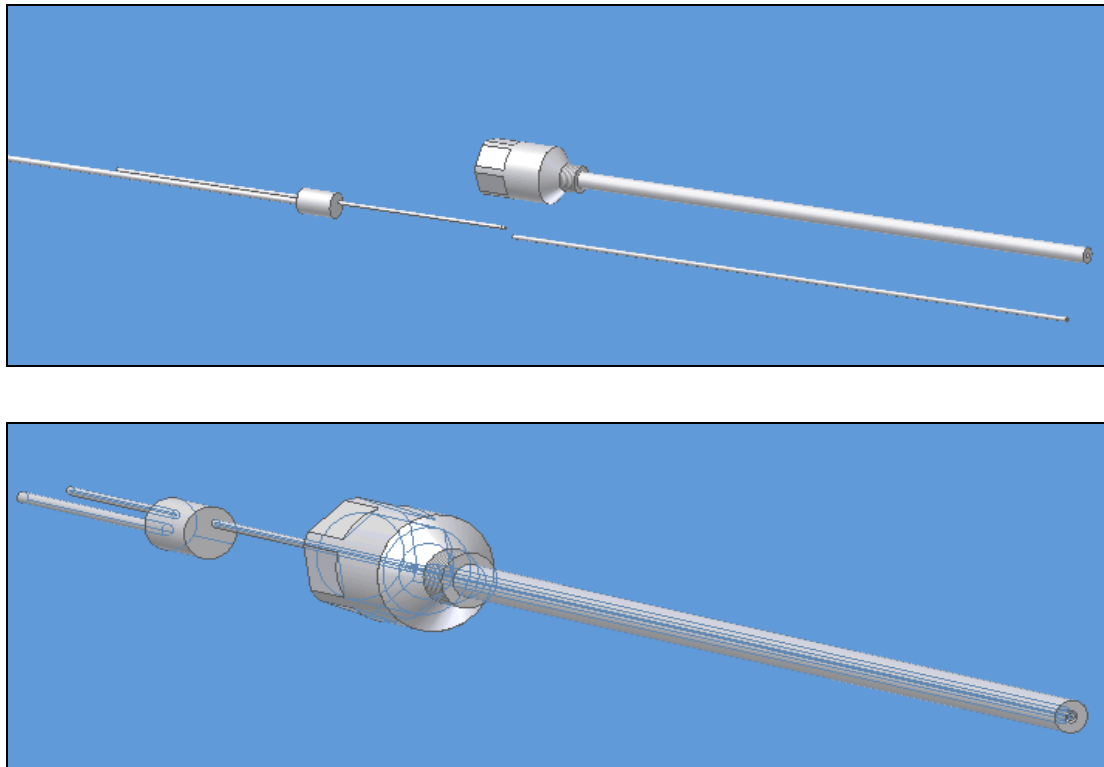


Σχήμα 3.3 –Απεικόνιση μεταβλητών και σταθερών παραμέτρων του αγωγού στήριξης της Texas Thermowell (Παράρτημα 4)

Η εταιρεία παρείχε μια σειρά επιλογών για την κάθε παράμετρο και μέσω της εικονικής συναρμολόγησης όλου του μοντέλου επιλέχθηκαν οι καταλληλότερες, από τις διαθέσιμες, διαστάσεις για την παρούσα εφαρμογή. Το σχετικό τεχνικό σχέδιο βρίσκεται στο παράρτημα 3 και λεπτομερής αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος γίνεται στο παράρτημα 4. Στο σχήμα 3.4 απεικονίζεται τρισδιάστατα ο ζητούμενος αγωγός και στο σχήμα 3.5 το συναρμολογημένο μοντέλο με τον δειγματολήπτη και την επέκταση, το οποίο και οδήγησε στον καθορισμό των απαιτούμενων διαστάσεων.



Σχήμα 3.4 –Τρισδιάστατη απεικόνιση αγωγού στήριξης

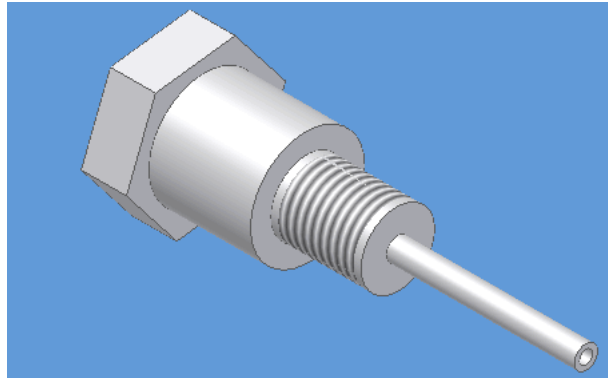


Σχήμα 3.5 –Αποσυναρμολογημένος και συναρμολογημένος δειγματολήπτης

3.4 Σχεδιασμός επιπρόσθετων εξαρτημάτων και τελικών διεργασιών για την υλοποίηση της εφαρμογής

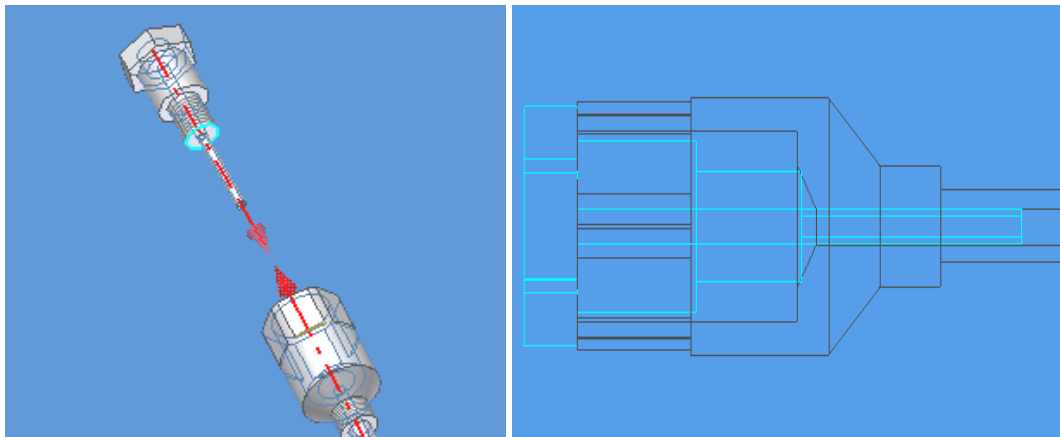
Στην τελική φάση του σχεδιασμού, προσδιορίστηκαν οι τελικές μετατροπές που έπρεπε να γίνουν στα εξαρτήματα που παραγγέλθηκαν, καθώς και τα επιπρόσθετα εξαρτήματα στήριξης που απαιτούνταν για την ορθή λειτουργία του μοντέλου.

Η ένωση του δειγματολήπτη και της επέκτασης έπρεπε να είναι κεντρική και να μην επιτρέπεται η σχετική κίνηση μεταξύ τους, ώστε να μην επηρεάζεται η ροή και κατ'επέκταση η δειγματοληψία. Για το λόγο αυτό, κατά την επιλογή των διαστάσεων του αγωγού στήριξης, περιορισμό στο μήκος αποτέλεσε το γεγονός ότι η ένωση έπρεπε να επιτυγχάνεται στο πίσω μέρος, μεγαλύτερης διαμέτρου του αγωγού, και όχι προς το μέσον αυτού, όπου η διάμετρος είναι μικρότερη. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκε ένα κυλινδρικό βιδωτό εξάρτημα στήριξης, με εσωτερική διάμετρο την εξωτερική των δειγματοληπτών, ώστε να προσαρμοστεί στο πίσω μέρος του αγωγού στήριξης. Το εξάρτημα αυτό κατασκευάστηκε στο μηχανουργείο του τομέα. Στο σχήμα 3.6 απεικονίζεται η τελική επιλογή του εξαρτήματος, σε τρισδιάστατη μορφή.



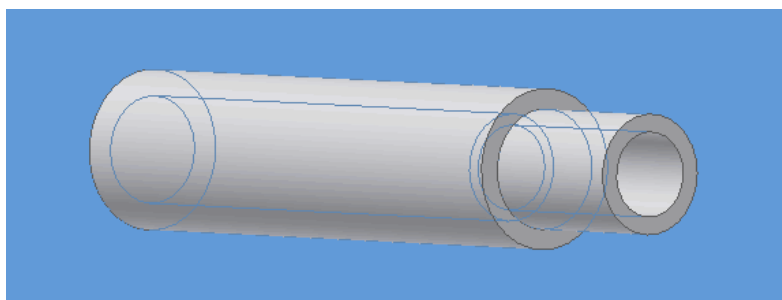
Σχήμα 3.6 – Εξάρτημα στήριξης

Για την καλύτερη κατανόηση της διάταξης, στην εικόνα 3.7 φαίνεται λεπτομέρεια του πίσω άκρου του αγωγού στήριξης με την ακριβή θέση του εξαρτήματος.



Σχήμα 3.7 – Συναρμογή εξαρτημάτων στο πίσω τμήμα του δειγματολήπτη

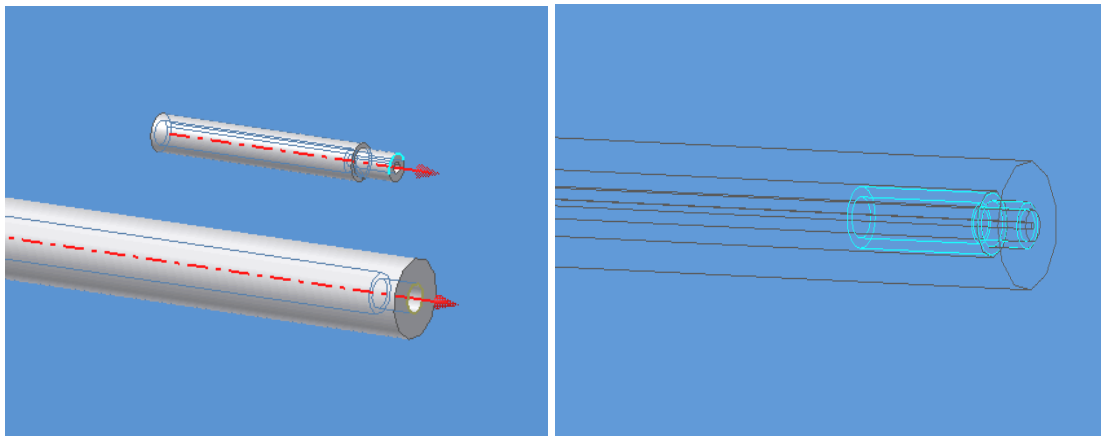
Σε επόμενο στάδιο έπρεπε να εξασφαλιστεί η πάκτωση του δειγματολήπτη στο μπροστινό άκρο του αγωγού, δηλαδή στο σημείο εισόδου του δείγματος. Η σχετική κίνηση του άκρου από την απότομη πίεση των καυσαερίων θα μπορούσε να εμποδίσει τη ροή και να καταστήσει τα αποτελέσματα της μέτρησης αναξιόπιστα. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκε δεύτερο εξάρτημα στήριξης, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 3.8, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη πάκτωση του δειγματολήπτη.



Σχήμα 3.8 – Εξάρτημα στήριξης εμπρόσθιου άκρου

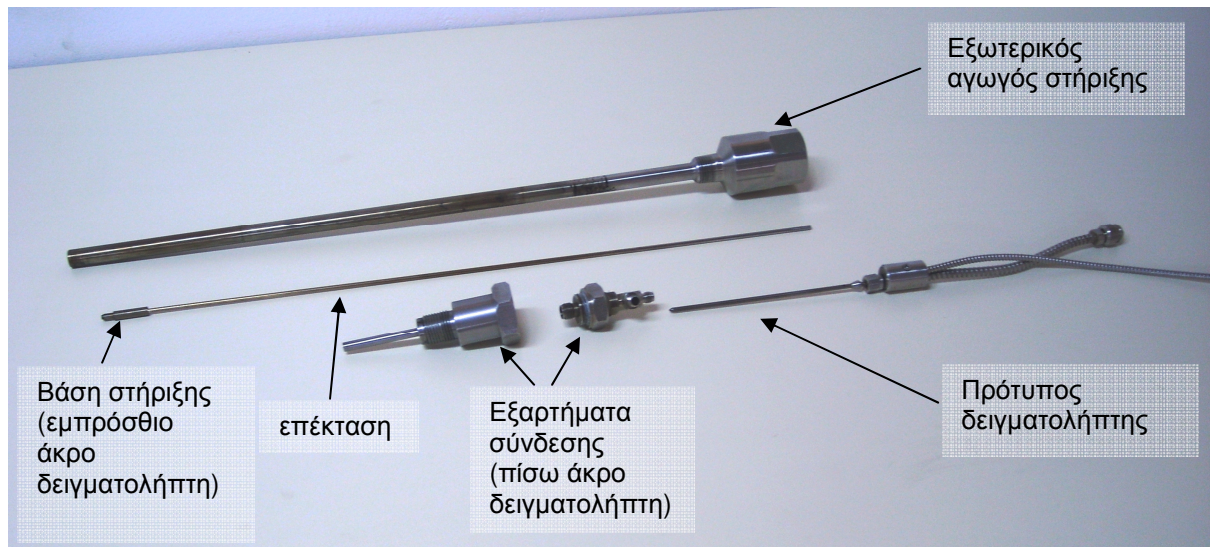
Το εξάρτημα αυτό λειτούργησε ως θήκη, η οποία προσαρμόστηκε μόνιμα στο εμπρόσθιο άκρο της κάθε επέκτασης.

Η εξωτερική διάμετρος της θήκης ήταν όμοια με την εσωτερική της οπής του αγωγού στήριξης. Στο σχήμα 3.9 φαίνεται η ακριβής θέση του εξαρτήματος στον αγωγό.



Σχήμα 3.9 – Συναρμογή εξαρτημάτων στο εμπρόσθιο άκρο του δειγματολήτη

Περαιτέρω διεργασίες φινιρίσματος εκτελέστηκαν μετά την παραλαβή, στις επεκτάσεις και στον αγωγό στήριξης, με στόχο την πλήρη συναρμολόγηση όλων των μερών. Το τελικό μοντέλο απεικονίζεται στο σχήμα 3.10, με όλα τα μέρη που το αποτελούν.



Σχήμα 3.10 – Ο δειγματολήτης σε κατάσταση εξάρμωσης και άρμωσης

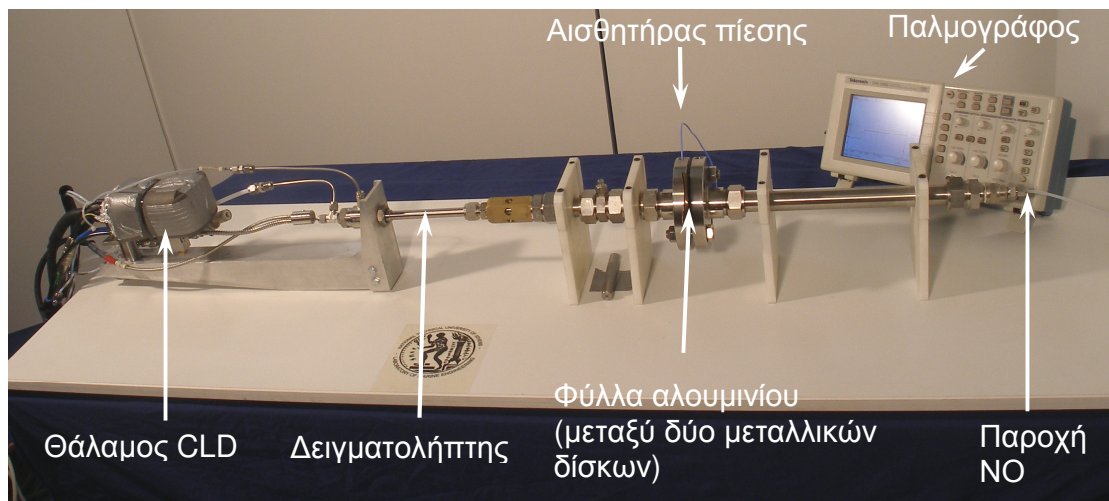
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΤΡΑΠΕΖΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 4 διερευνάται η ταχύτητα μέτρησης των δειγματοληπτών που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Η πειραματική διερεύνηση των δειγματοληπτών διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου διεξάγεται σε τράπεζα δοκιμών (flow bench) με στόχο την αρχική αξιολόγηση του χρόνου απόκρισης του κάθε δειγματολήπτη. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ήταν σύμφωνα με τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης που προηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2.

4.1 Περιγραφή διαδικασίας δοκιμών

Για την διερεύνηση των παραμέτρων των δειγματοληπτών που αναπτύχθηκαν, έγιναν μετρήσεις σε τράπεζα δοκιμών του εργαστηρίου, με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά των δειγματοληπτών σε διάφορες, ελεγχόμενες συνθήκες. Οι μετρήσεις διεξάχθηκαν με αέριο μονοξείδιο του αζώτου (NO), γνωστής περιεκτικότητας (1692ppm) και υπό διαφορετικές πιέσεις εισόδου του αερίου. Η τράπεζα δοκιμών φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.1 – Τράπεζα δοκιμών

Η διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως, είχε σαν αποτέλεσμα την αναπαράσταση των συνθηκών δειγματοληψίας σε μία κανονική μηχανή, δηλαδή την είσοδο των καυσαερίων στο δειγματολήπτη από συγκεκριμένο κύλινδρο, μόλις ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής του, σε ένα κύκλο λειτουργίας.

Αέριο NO γνωστής περιεκτικότητας, από φιάλη υπό πίεση, διοχετευόταν μέσω του σωλήνα παροχής στην διάταξη. Οι δύο μεταλλικοί δίσκοι που φαίνονται στο σχήμα 4.1, συγκρατούσαν φύλλα αλουμινίου, τα οποία εμπόδιζαν τη ροή του αερίου πριν την ανάπτυξη συγκεκριμένης πίεσης στον θάλαμο πριν τα φύλλα. Μόλις η πίεση έφτανε σε επίπεδα όπου επερχόταν η

θραύση των φύλλων αλουμινίου, η ροή ελευθερωνόταν και αέριο εισερχόταν στο δειγματολήπτη. Η πίεση εισόδου διέφερε ανάλογα με τον αριθμό των φύλλων αλουμινίου. Ο δειγματολήπτης τοποθετήθηκε, σε κάθε περίπτωση, πίσω από το σημείο της θραύσης ώστε η πίεση εισόδου να μπορεί να θεωρηθεί εκείνη που μετρούσε ο αισθητήρας πίεσης, ο οποίος ήταν τοποθετημένος μετά το σημείο ρήξης, στον δεύτερο μεταλλικό δίσκο (σχήμα 4.1).

Μέρος του αερίου κατέληγε στο θάλαμο χημικής φωταύγειας μέσω του δειγματολήπτη, όπου γινόταν η μέτρηση της περιεκτικότητας NO σε ppm.

Το σήμα της μέτρησης του αναλυτή χημικής φωταύγειας, καταγραφόταν στον παλμογράφο για μικρό χρονικό διάστημα, με σκοπό την απεικόνιση κρίσιμων μεγεθών (χρόνοι απόκρισης). Ως έναρξη της μέτρησης των NO θεωρήθηκε η απότομη αύξηση της πίεσης που μετρούσε ο αισθητήρας πίεσης, μόλις γινόταν η ρήξη των φύλλων αλουμινίου, και συνεπώς το αέριο εισερχόταν στο δειγματολήπτη. Ο παλμογράφος παρέχει δυνατότητα καταγραφής 2500 σημείων και με κατάλληλη συνάρτηση τα σημεία αντιστοιχούν σε χρονικό διάστημα 250msec (στη συγκεκριμένη ρύθμιση όπου εκτελέστηκαν οι δοκιμές). Με τις κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς, τα σήματα από το μηχάνημα (NO σε Volt) και τον ενισχυτή (πίεση σε Volt) μετατρέπονταν στις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης (ppm και bar αντίστοιχα) και τα αποτελέσματα μπορούσαν να μελετηθούν στο πεδίο του χρόνου.

4.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων τράπεζας δοκιμών

4.2.1 Διερεύνηση δειγματοληπτών διαφορετικών διαμέτρων

Στη φάση του σχεδιασμού, όπως αναφέρθηκε, επιλέχθηκαν έξι δειγματολήπτες προς κατασκευή και εξέταση της συμπεριφοράς αυτών, ως προς τους χρόνους απόκρισης και την αξιοπιστία των μετρήσεων που παρείχαν. Οι δειγματολήπτες είχαν ίδιο μήκος (650mm) και οι επεκτάσεις μήκους 500mm είχαν διαφορετικές διαμέτρους (0.30 mm, 0.50 mm, 0.66mm, 0.80mm, 1.00mm, 1.20mm).

Η επιλογή των διαστάσεων και η διαδικασία κατασκευής ήταν αυτή που περιγράφεται στην παράγραφο 3, με προσαρμογή δηλαδή των διαφόρων επεκτάσεων, μήκους 500mm, ίδιας εξωτερικής και διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου, στον πρότυπο δειγματολήπτη της Cambustion, μήκους 150mm.

Ο πρότυπος δειγματολήπτης καθώς και οι επεκτάσεις είναι από ανοξείδωτο χάλυβα. Σε κάθε περίπτωση ο πρότυπος δειγματολήπτης θερμαινόταν στους 150°C (Παράρτημα 1), ενώ η προσαρμοσμένη επέκταση δεν είχε θερμαντικά μέσα, καθώς κρίθηκε μη αναγκαίο, λόγω της τοποθέτησής της μέσα στο σύστημα εξαγωγής του κινητήρα, όπου λόγω της μεταφοράς θερμότητας από τα γύρω εξαρτήματα και τα καυσαέρια, η θερμοκρασία θα ήταν πάντοτε πάνω από 150°C.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα τα βασικά χαρακτηριστικά των δειγματοληπτών.

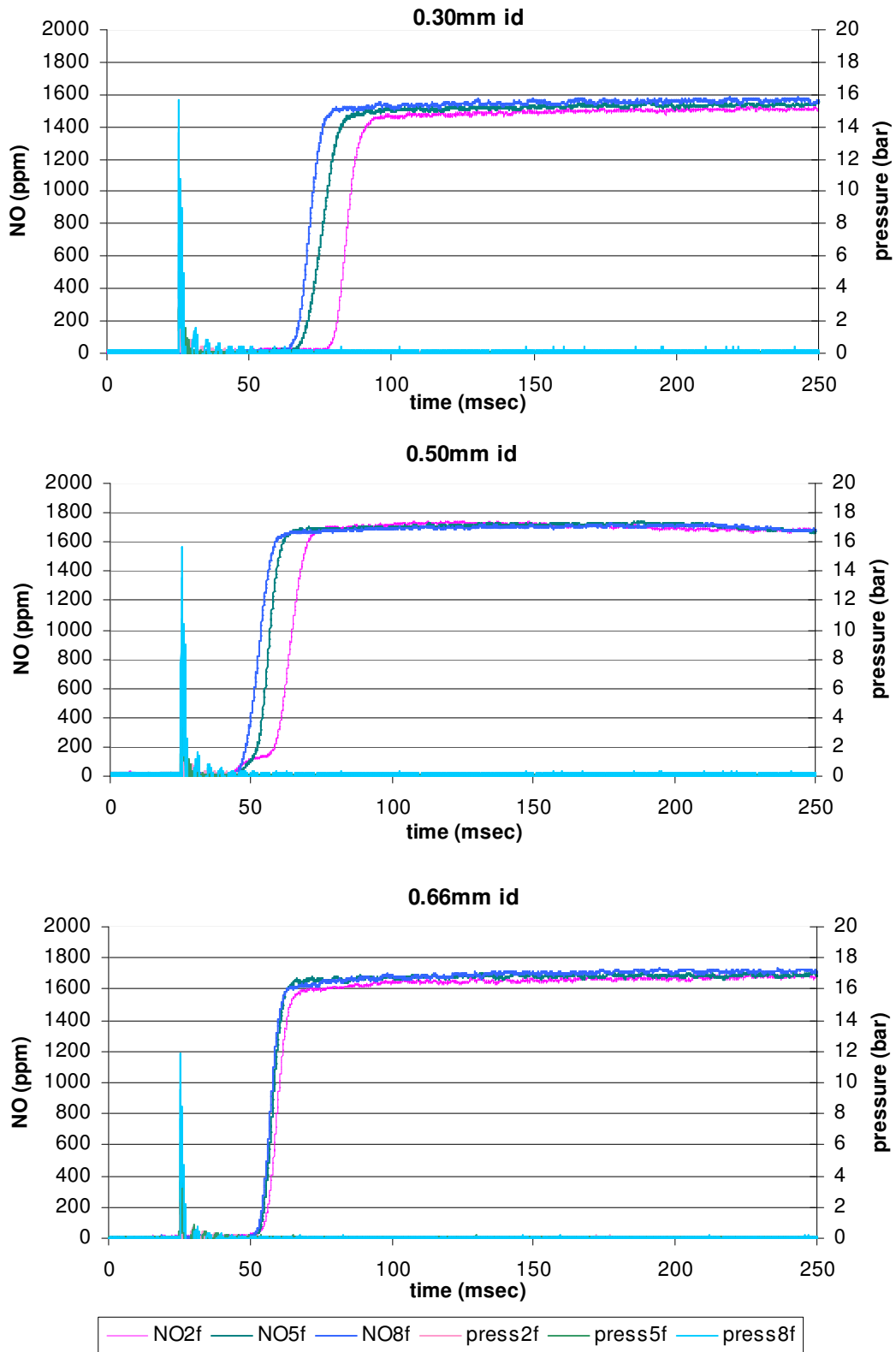
δειγματολήπτες	υλικό	μήκος (mm)	εσωτερική διάμετρος(mm)	εξωτερική διάμετρος (mm)
πρότυπος δειγματολήπτης Cambustion	ανοξειδωτος χάλυβας	150	0.66	3.176
επέκταση 1	ανοξειδωτος χάλυβας	500	0.30	3.176
επέκταση 2	ανοξειδωτος χάλυβας	500	0.50	3.176
επέκταση 3	ανοξειδωτος χάλυβας	500	0.66	3.176
επέκταση 4	ανοξειδωτος χάλυβας	500	0.80	3.176
επέκταση 5	ανοξειδωτος χάλυβας	500	1.00	3.176
επέκταση 6	ανοξειδωτος χάλυβας	500	1.20	3.176

Πίνακας 4.1 – Βασικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη δειγματοληπτών στην πρώτη φάση της διερεύνησης

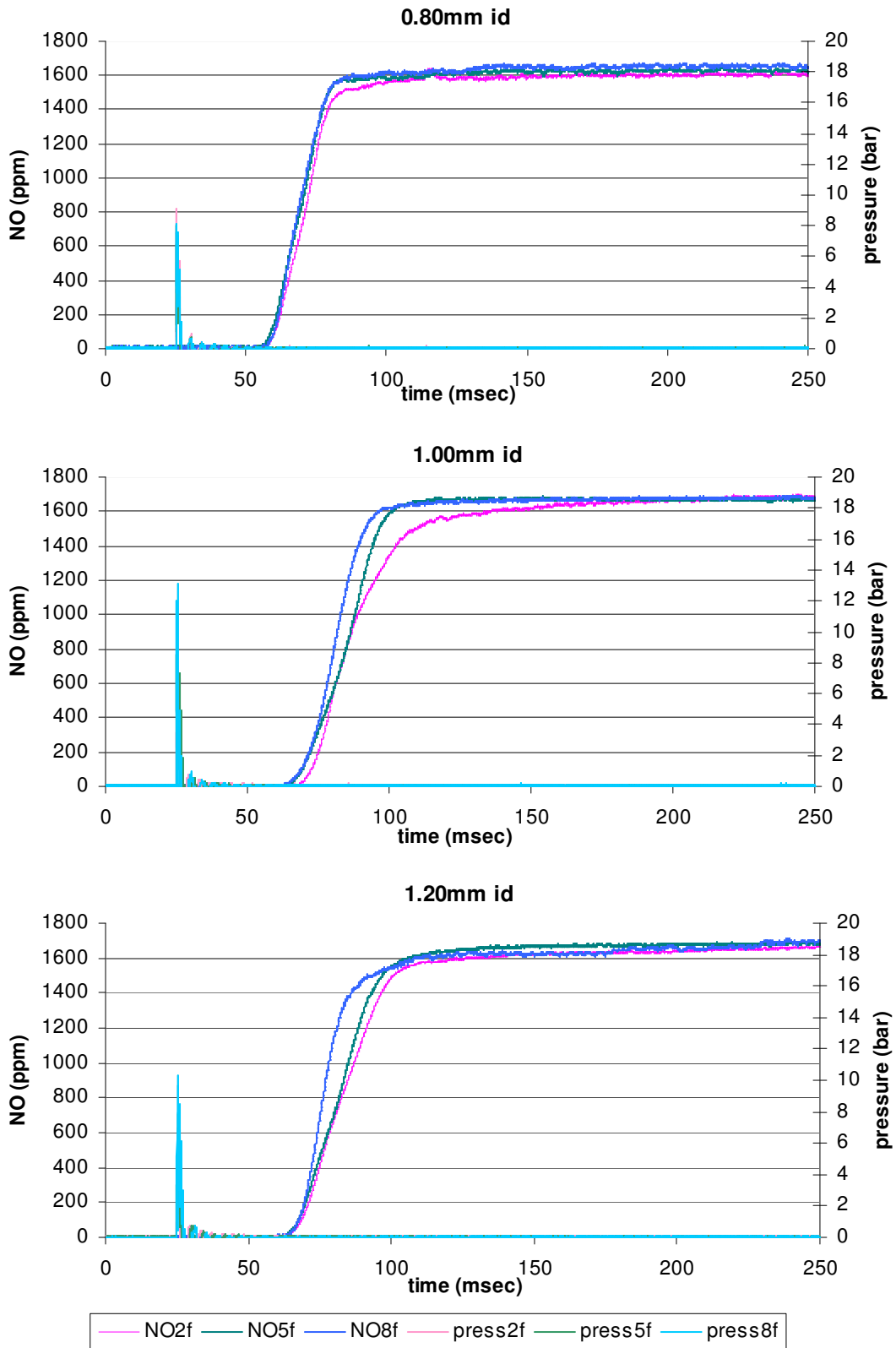
Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν με δύο, πέντε και οχτώ φύλλα αλουμινίου. Ο αριθμός των φύλλων είναι ευθέως ανάλογος της πίεσης που αναπτύσσεται για τη ρήξη τους, επομένως και της πίεσης εισόδου του αερίου στο δειγματολήπτη. Οι τρεις περιπτώσεις μπορούν να προσομοιώσουν τρία φορτία του κινητήρα, το χαμηλό (2 φύλλα), το μεσαίο (5 φύλλα) και το υψηλό (8 φύλλα). Στη συνέχεια παρατίθενται γραφικά αποτελέσματα των μετρήσεων για στιγμιαία παροχή του αερίου με σκοπό την μελέτη των χρονικών παραμέτρων που αναλύθηκαν στην παράγραφο 1.3 ('Χρονικοί παράμετροι μετρητικού συστήματος').

4.2.1.1 Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων για τις έξι επεκτάσεις

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην τράπεζα δοκιμών για τις έξι επεκτάσεις με στόχο την μελέτη της επίδρασης της πίεσης για κάθε διάμετρο, στο χρόνο απόκρισης του μετρητικού συστήματος. Για κάθε δειγματολήπτη εκτελέστηκε σειρά δοκιμών σε κάθε πίεση και παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για κάθε έναν στις τρεις πιέσεις δοκιμών. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, η ένδειξη NO2f αφορά στη μέτρηση των NO σε ppm, για 2 φύλλα αλουμινίου, η ένδειξη NO5f αφορά στη μέτρηση για 5 φύλλα αλουμινίου και η ένδειξη NO8f όμοια, αφορά στα 8 φύλλα αλουμινίου.



Σχήμα 4.2 α– Αποτελέσματα τράπεζας δοκιμών για τους δειγματολήπτες εσωτερικής διαμέτρου 0.3, 0.5 και 0.66mm, στις τρεις πιέσεις



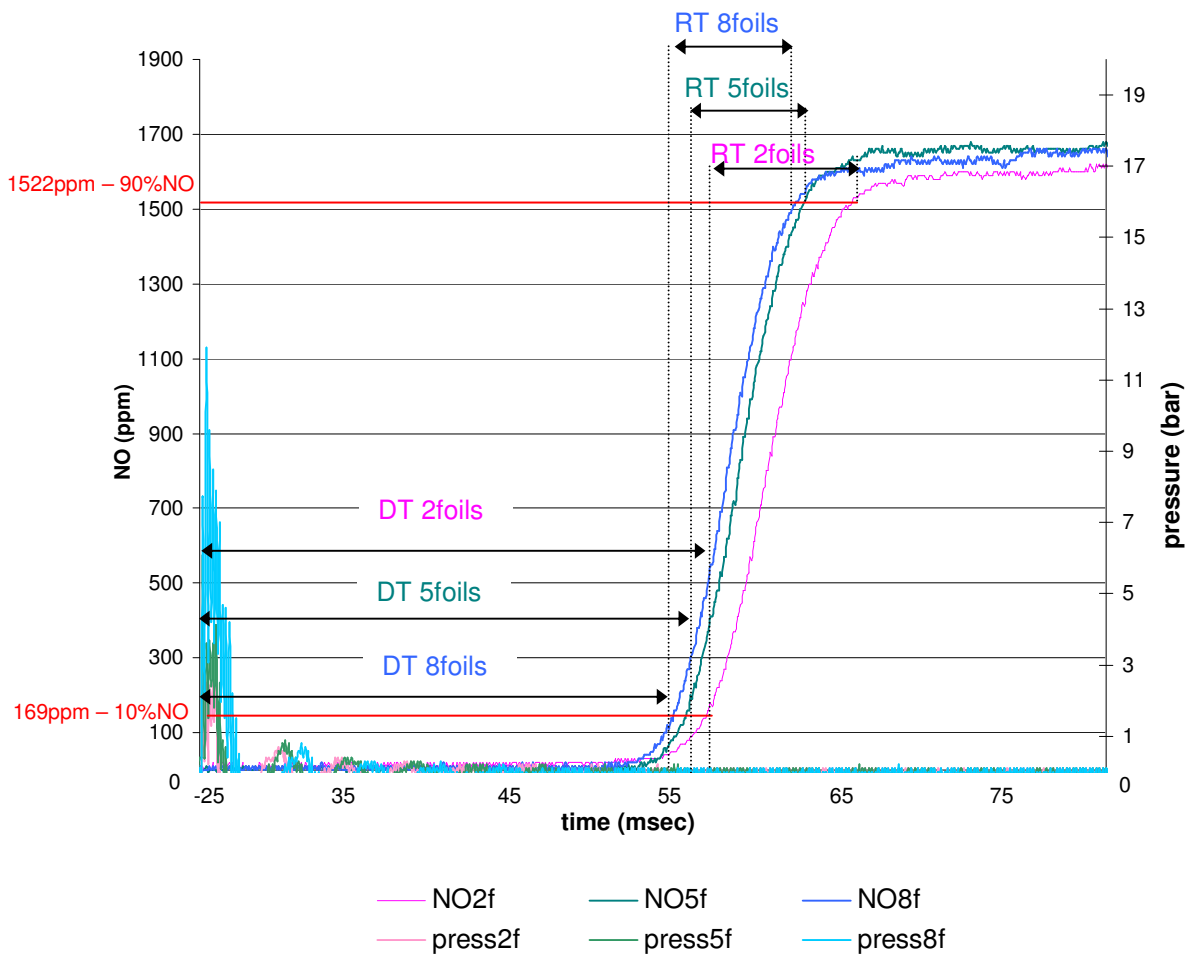
Σχήμα 4.2β– Αποτελέσματα τράπεζας δοκιμών για τους δειγματολήπτες εσωτερικής διαμέτρου 0.8, 1.0 και 1.2 mm, στις τρεις πιέσεις

4.2.1.2 Υπολογισμοί κρίσιμων χρονικών παραμέτρων

Οι χρόνοι απόκρισης για κάθε δοκιμή υπολογίστηκαν ακολούθως:

- Ο χρόνος καθυστέρησης (DT), είναι ο χρόνος από την έναρξη της μέτρησης, δηλαδή από την απότομη αύξηση της πίεσης, ως το σημείο της καμπύλης των NO, που αντιστοιχεί στο 10% της περιεκτικότητας του αερίου (169 ppm).
- Ο χρόνος ανύψωσης (RT), είναι ο χρόνος μεταξύ των σημείων της καμπύλης των NO, που αντιστοιχούν στο 10% (169 ppm) και 90% (1522 ppm) της περιεκτικότητας.

Στο σχήμα 4.3, φαίνεται παράδειγμα των υπολογισμών αυτών για τυχαία δοκιμή. Η διαδικασία είναι η ίδια σε κάθε περίπτωση και για όλους τους δειγματολήπτες.



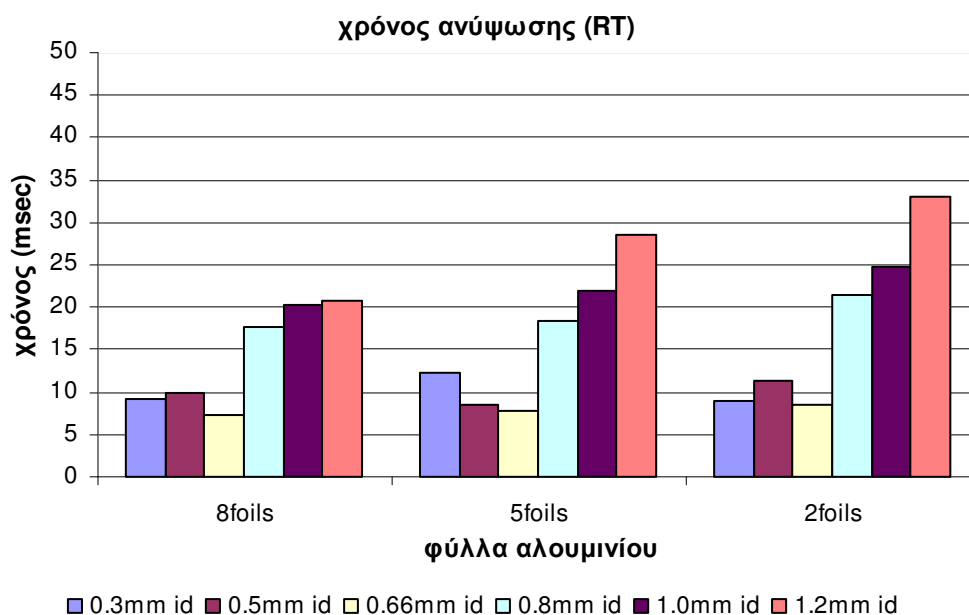
Σχήμα 4.3 – Παράδειγμα υπολογισμού χρόνων απόκρισης για μετρήσεις με 2,5 και 8 φύλλα αλουμινίου

Στον πίνακα 4.2 παρατίθενται οι χρόνοι για τους έξι δειγματολήπτες στις τρεις πιέσεις δοκιμών.

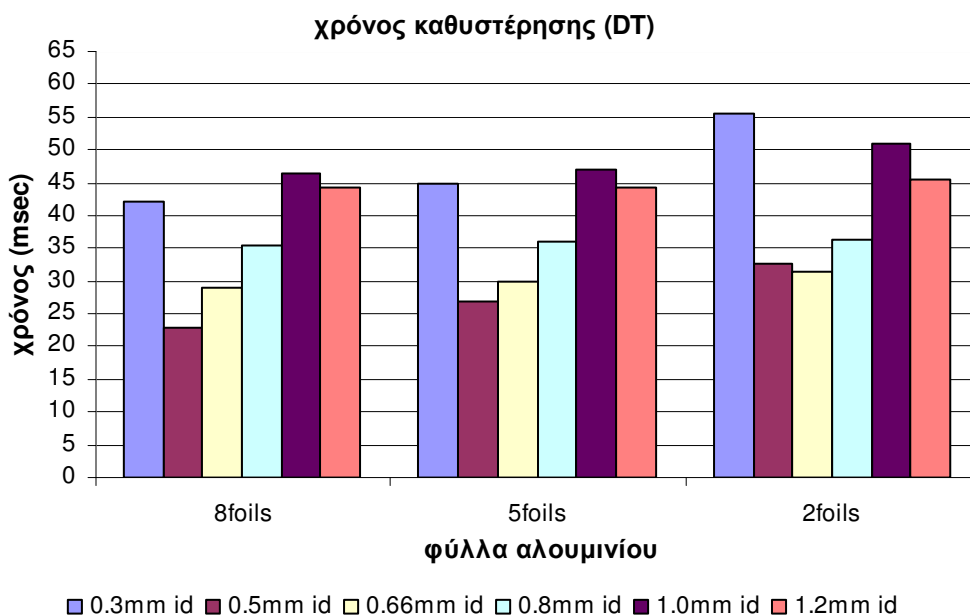
		επέκταση 1 (0.30mm)	επέκταση 2 (0.50mm)	επέκταση 3 (0.66mm)	επέκταση 4 (0.80mm)	επέκταση 5 (1.00mm)	επέκταση 6 (1.20mm)
2 foils test	DT (msec)	55.5	32.7	31.3	36.2	51	45.5
	RT (msec)	8.9	11.4	8.5	21.5	24.7	33
5 foils test	DT (msec)	45	26.8	29.8	36.1	47	44.4
	RT (msec)	12.3	8.5	7.7	18.3	21.9	28.6
8 foils test	DT (msec)	42.2	22.9	29	35.4	46.3	44.2
	RT (msec)	9.3	9.8	7.3	17.6	20.4	20.8

Πίνακας 4.2 – Χρόνοι απόκρισης για τους έξι δειγματολήπτες από δοκιμές στην τράπεζα δοκιμών

Για καλύτερη απεικόνιση, στο σχήμα 4.4α παρατίθενται οι ανώτερες παράμετροι διαγραμματικά. Το πρώτο διάγραμμα αφορά στους χρόνους ανύψωσης των 6 δειγματοληπτών, στις 3 πιέσεις δοκιμών και το σχήμα 4.4β, στους χρόνους καθυστέρησης.



Σχήμα 4.4α – Χρόνοι ανύψωσης (RT) των 6 επεκτάσεων (μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών)



Σχήμα 4.4β – Χρόνοι καθυστέρησης (DT) των 6 επεκτάσεων (μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών)

Τα αποτελέσματα των δοκιμών στην πειραματική διάταξη έδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επεκτάσεων με διαφορετική διάμετρο. Με αρκετές επαναλήψεις των μετρήσεων, διεξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- επέκταση # 1 (0.3 mm)

Η ένδειξη των NO του αναλυτή CLD, με τη χρήση του δειγματολήπτη εσωτερικής διαμέτρου 0.30 mm, είχε ως μέγιστη τιμή καταγραφής τα 1500ppm, μέσα σε αποδεκτούς χρόνους (<250msec). Από το αντίστοιχο διάγραμμα του σχήματος 4.2α παρατηρείται η προσέγγιση της τιμής αυτής (με πραγματική περιεκτικότητα του αερίου τα 1692ppm). Η θεωρητική ανάλυση της ροής σε αυτόν τον δειγματολήπτη (κεφάλαιο 2), έδειξε ότι σε κάθε περίπτωση από αυτές που εξετάστηκαν, η ροή στο εσωτερικό ήταν στρωτή και στραγγαλισμένη στην έξοδο. Οι συνθήκες αυτές πιθανώς αιτιολογούν την συμπεριφορά του δειγματολήπτη. Για την μελέτη των κρίσιμων χρόνων λήφθηκε σαν μέγιστη, η τιμή των 1500ppm και οι υπολογισμοί έγιναν όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1.2. Παρατηρείται ότι η μεταβολή (αύξηση) της πίεσης, βελτίωσε σημαντικά το χρόνο καθυστέρησης (DT), ενώ δεν επηρέασε σημαντικά το χρόνο ανύψωσης (RT).

- επέκταση # 2 (0.5 mm)

Ο δειγματολήπτης εσωτερικής διαμέτρου 0.50 mm, παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα από τον 0.30 mm, επιτυγχάνοντας την μέγιστη ένδειξη (1692ppm) σε αποδεκτούς χρόνους. Παρατηρείται όμοια με την προηγούμενη επέκταση, σημαντική επίδραση της αύξησης της πίεσης στον χρόνο καθυστέρησης και βελτίωση του χρόνου ανύψωσης από τα 2 στα 5 φύλλα.

Στα 8 φύλλα, που αντιστοιχούν στη μέγιστη πίεση που εξετάστηκε, παρατηρήθηκε αύξηση του χρόνου ανύψωσης (σε σχέση με τα 5 φύλλα), γεγονός που πιθανώς οφείλεται στο ότι στην πίεση αυτή αναμένεται στραγγαλισμός της ροής στην έξοδο.

- επέκταση # 3 (0.66 mm)

Για το δειγματολήπτη εσωτερικής διαμέτρου 0.66 mm, διάμετρος που συμπίπτει με εκείνη του πρότυπου, παρατηρείται σημαντική βελτίωση των κρίσιμων χρονικών παραμέτρων. Η αύξηση της πίεσης δεν προκάλεσε ιδιαίτερες μεταβολές στο χρόνο καθυστέρησης, με βελτίωση περίπου 1.6% αναλογικά με την αύξηση της πίεσης. Σταθερή συμπεριφορά παρουσίασε και ο χρόνος ανύψωσης, γεγονός ιδιαίτερης σημασίας για την λειτουργία του αναλυτή, όταν υπόκειται στις διακυμάνσεις πίεσης των αερίων, στο σύστημα εξαγωγής. Η τιμή της παραμέτρου αυτής, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, ήταν σε κάθε πίεση αρκετά χαμηλή και κοντά σε εκείνη που προδιαγράφεται για τον πρότυπο δειγματολήπτη ($RT \approx 5msec$).

- επέκταση # 4 (0.8 mm)

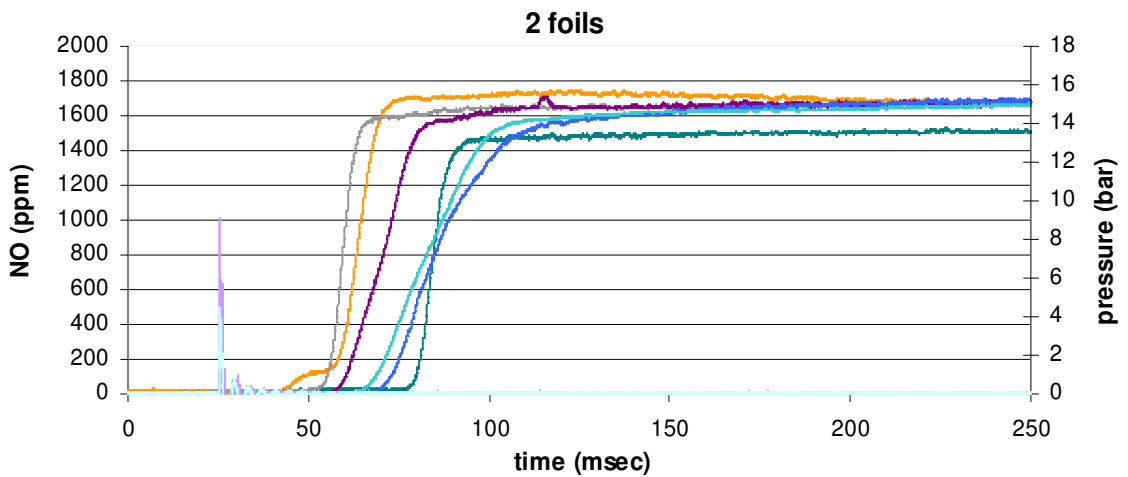
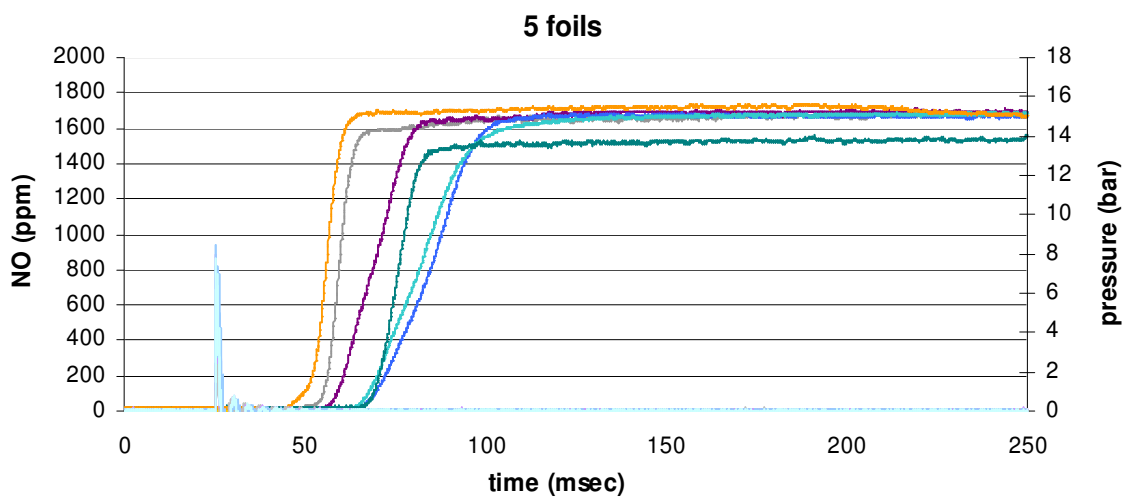
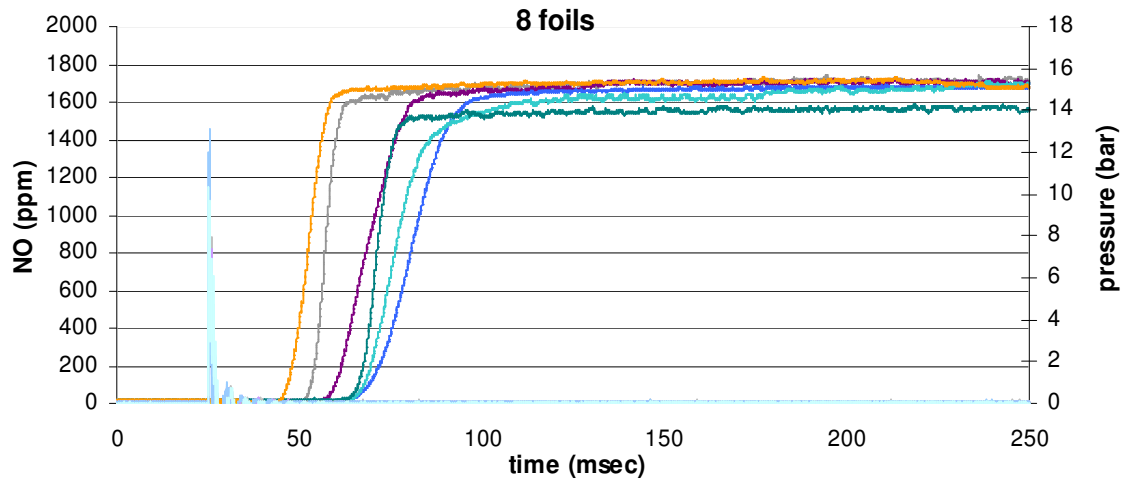
Με την περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου στα 0.80mm, παρατηρήθηκε σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά από εκείνη των δειγματοληπτών με τις μικρότερες της πρότυπης διαμέτρου (0.66mm). Το φαινόμενο της δραστικής επίδρασης της πίεσης στο χρόνο καθυστέρησης, που είχε παρατηρηθεί στις διαμέτρους 0.30 και 0.50mm, εξαλείφθηκε. Αντίθετα όμως με την σχετικά μικρή επίδραση της σταδιακής αύξησης της διαμέτρου στο χρόνο ανύψωσης, φαινόμενο που είχε παρατηρηθεί στις επεκτάσεις 1, 2 και 3, η επέκταση 4 παρουσίασε διπλάσιους χρόνους από την 3. Σύμφωνα με την θεωρητική ανάλυση, οι αριθμοί Reynolds για τις τρεις πιέσεις που εξετάστηκαν στην παράγραφο 2.3.2, είναι αρκετά χαμηλοί και αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση σε στρωτή ροή, με αρκετά μικρές ταχύτητες στην έξοδο.

- επεκτάσεις # 5 και # 6 (1.0 και 1.2 mm αντίστοιχα)

Οι δειγματολήπτες εσωτερικής διαμέτρου 1.00 mm και 1.20 mm, παρουσίασαν ανάλογη συμπεριφορά με την επέκταση 4, με περαιτέρω αύξηση και στις δύο χρονικές παραμέτρους. Παρατηρείται ότι για κάθε 0.2 mm αύξησης της διαμέτρου, ο χρόνος ανύψωσης ήταν αντίστοιχα διπλάσιος, τριπλάσιος και τετραπλάσιος εκείνου που αντιστοιχεί στην επέκταση 3, έχοντας θεωρήσει το χρόνο αυτής ως αναφοράς.

Όσον αφορά το χρόνο καθυστέρησης, παρατηρείται ότι για κάθε διάμετρο ήταν περίπου σταθερός. Όμοια με τον χρόνο ανύψωσης, αυξήθηκε με την αύξηση της διαμέτρου, όμως η επίδραση ήταν αρκετά μικρότερη, καθώς διπλασιάζοντας τη διάμετρο παρουσίαζε μία αύξηση περίπου 15msec σε αντίθεση με το χρόνο ανύψωσης που, όπως αναφέρθηκε, περίπου τετραπλασιάστηκε.

Στη συνέχεια παρατίθενται γραφικά, συγκριτικά αποτελέσματα των έξι δειγματοληπτών, για τις τρεις πιέσεις που εξετάστηκαν, για καλύτερη απεικόνιση των όσων αναφέρθηκαν (σχήμα 4.5) .



— NO 0.30 — NO 0.50 — NO 0.66 — NO 0.80 — NO 1.00 — NO 1.20
 — press 0.30 — press 0.50 — press 0.66 — press 0.80 — press 1.00 — press 1.20

Σχήμα 4.5 – Συγκριτικά αποτελέσματα των διαφόρων επεκτάσεων με 2,5 και 8 φύλλα αλουμινίου

Η ανάλυση τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, έδειξε ότι βέλτιστη διάμετρος είναι εκείνη του πρότυπου δειγματολήπτη (0.66mm) . Από τη θεωρητική διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής της διαμέτρου, δείχθηκε ότι οι μικρότερες και οι μεγαλύτερες της πρότυπης, δεν παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά για τα διάφορα φορτία. Πιο συγκεκριμένα, οι διάμετροι των επεκτάσεων 1, 5 και 6 (0.30mm ,1.0mm και 1.2mm αντίστοιχα), έδωσαν σε κάθε περίπτωση πολύ χαμηλούς αριθμούς Reynolds που δεν αντιστοιχούσαν σε τυρβώδη ροή. Το μέγεθος αυτό, όπως αναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερης σημασίας για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της μέτρησης. Η ασταθής και μη ικανοποιητική συμπεριφορά αυτών των επεκτάσεων ήταν εμφανής και στην τράπεζα δοκιμών.

Αναφορικά με τις επεκτάσεις 2 και 4 (0.5mm και 0.8mm), τα αποτελέσματα αυτών μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτά ως προς τις κρίσιμες χρονικές παραμέτρους της επέκτασης 3 (0.66mm), η οποία έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Εισαγωγή

Στο τελικό στάδιο αυτής της μελέτης έγινε εκτίμηση της απόκρισης των δειγματοληπτών που κατασκευάστηκαν, υπό κανονικές συνθήκες καύσης και λειτουργίας κινητήρα. Εκτελέστηκε σειρά δοκιμών στον τετράχρονο, πειραματικό, κινητήρα Diesel, MAN L16/24, πέντε κυλίνδρων, του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας (παράρτημα 5) . Οι δειγματολήπτες τοποθετήθηκαν σε κάθε περίπτωση λίγα χιλιοστά (10mm) πίσω από την βαλβίδα εξαγωγής του κυλίνδρου 1, μέσω του αγωγού εξαγωγής καυσαερίων, όπως φαίνεται στα σχήματα 1.7 και 5.1. Η δειγματοληψία εκτελέστηκε σε διαφορετικά φορτία, 90%,75%,50% και 25%, με σταθερή ταχύτητα στις 1200RPM. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση των συνθηκών που εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις υπό κανονικές συνθήκες καύσης, αφορά στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων και στις διακυμάνσεις της πίεσης.

Μετρήσεις εκτελέστηκαν με τις έξι επεκτάσεις διαφορετικής εσωτερικής διαμέτρου, που προσαρμόζονταν στον πρότυπο δειγματολήπτη.



Σχήμα 5.1– Θέση δειγματολήπτη στο σύστημα εξαγωγής του κινητήρα του εργαστηρίου

5.1 Υπολογισμοί κρίσιμων χρονικών παραμέτρων μετρήσεων σε ναυτικό κινητήρα

Οι κρίσιμες χρονικές παράμετροι, οι οποίες ορίστηκαν στην παράγραφο 1.3, υπολογίστηκαν ως εξής:

-Χρόνος καθυστέρησης (DT)

Ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, έως ότου η ένδειξη του μετρητικού μηχανήματος πάρει την τιμή που αντιστοιχεί στο 10% της μέγιστης ένδειξης (μέγιστη περιεκτικότητα σε NO για το συγκεκριμένο κύκλο).

Σε αντίθεση με τις μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών, η ένδειξη NO, πριν από την απότομη αύξηση και μετά από την μείωση των NO, δεν μηδενίζεται, αλλά βρίσκεται σε σταθερά επίπεδα, 200 με 300ppm. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη καυσαερίων στον αγωγό εξαγωγής του κυλίνδρου 1, από τους υπόλοιπους κυλίνδρους της μηχανής. Για τον υπολογισμό του χρόνου καθυστέρησης υπολογίζεται το 10% της μεταβολής της περιεκτικότητας από τη στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής μέχρι τη μέγιστη ένδειξη και προστίθεται στη μέση τιμή της ένδειξης που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο η βαλβίδα είναι κλειστή (δηλαδή στα 200 με 300 ppm που προαναφέρθηκαν) .

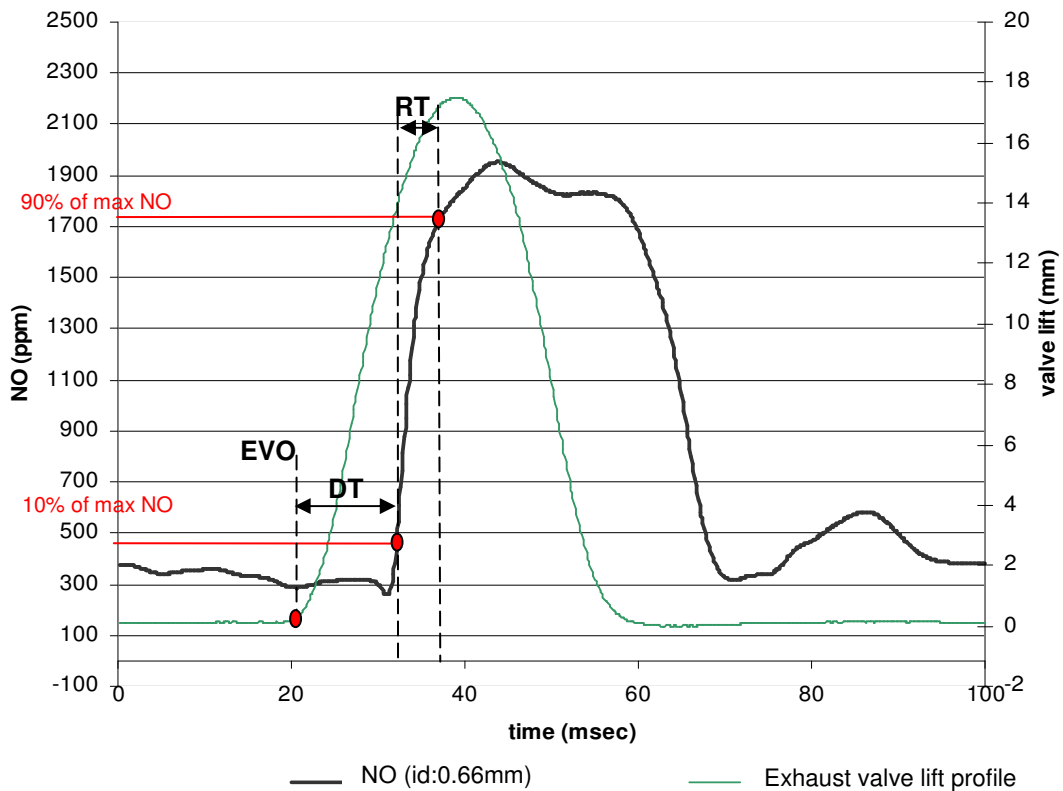
Συνοπτικά, η διαδικασία περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα :

- Εύρεση μέγιστης τιμής περιεκτικότητας στον εξεταζόμενο κύκλο ($\max NO$) .
 - Εύρεση ελάχιστης τιμής περιεκτικότητας ($\min NO$), που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή και που η ένδειξη θα ήταν μηδενική αν δεν λειτουργούσαν οι υπόλοιποι κύλινδροι.
 - Υπολογισμός του 10% της μεταβολής των τιμών αυτών $(\max NO - \min NO) \cdot 10\%$.
 - Πρόσθεση στην τιμή που αντιστοιχεί στην μηδενική ένδειξη
$$\min NO + (\max NO - \min NO) \cdot 10\%$$
- Η τιμή της παραπάνω παράστασης είναι το διορθωμένο για την απόκλιση της μηδενικής ένδειξης, 10% της μέγιστης περιεκτικότητας.

-Χρόνος ανύψωσης (RT)

Αυτή η παράμετρος υπολογίζεται ως το διάστημα που χρειάστηκε το μετρητικό μηχάνημα για να δείξει την ένδειξη που αντιστοιχεί στο 90% της μέγιστης τιμής, μετρούμενο από την τιμή εκείνη που αντιστοιχεί στο διορθωμένο 10%, η οποία υπολογίζεται με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως.

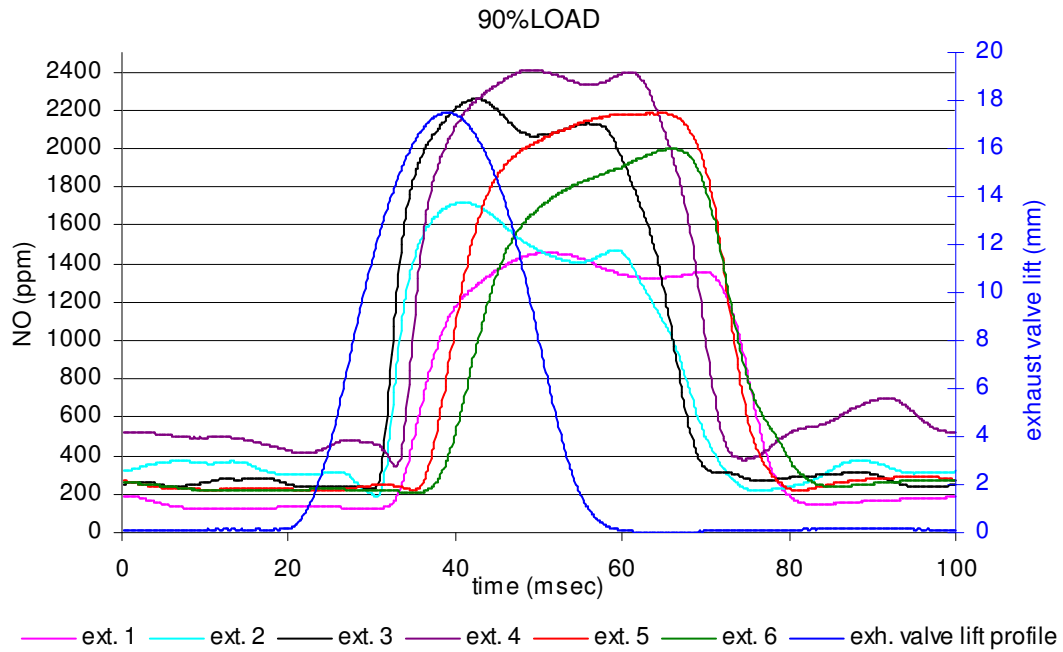
Στο σχήμα 5.2 απεικονίζεται γραφικά ο προσδιορισμός των κρίσιμων παραμέτρων για τυχαία μέτρηση.



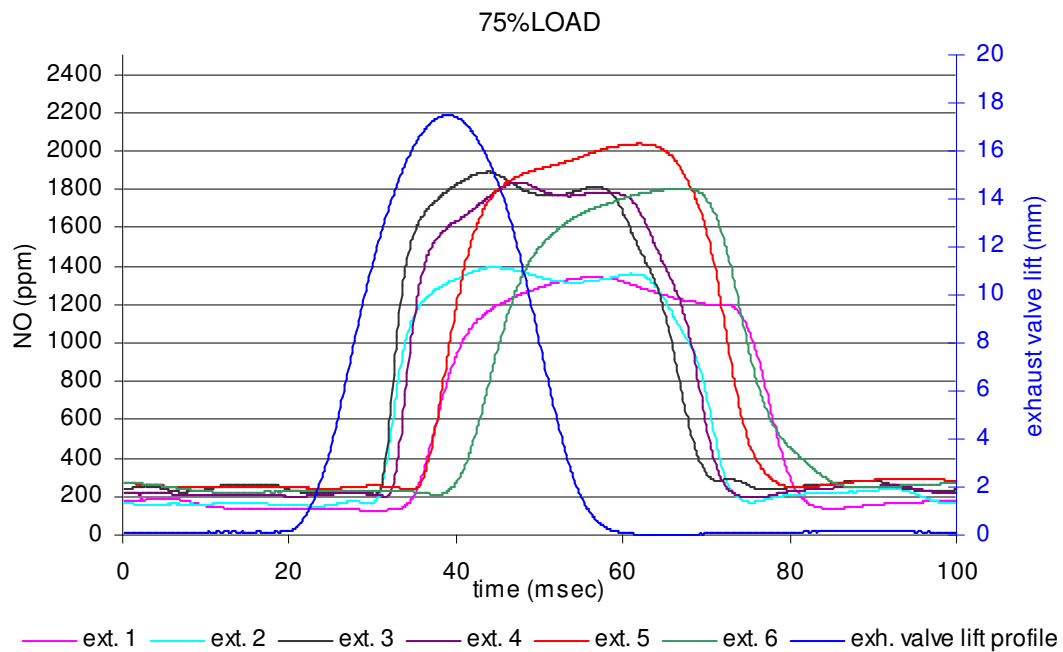
Σχήμα 5.2– Παράδειγμα υπολογισμού κρίσιμων χρονικών παραμέτρων για μετρήσεις στον κινητήρα

5.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων των επεκτάσεων διαφορετικής διαμέτρου

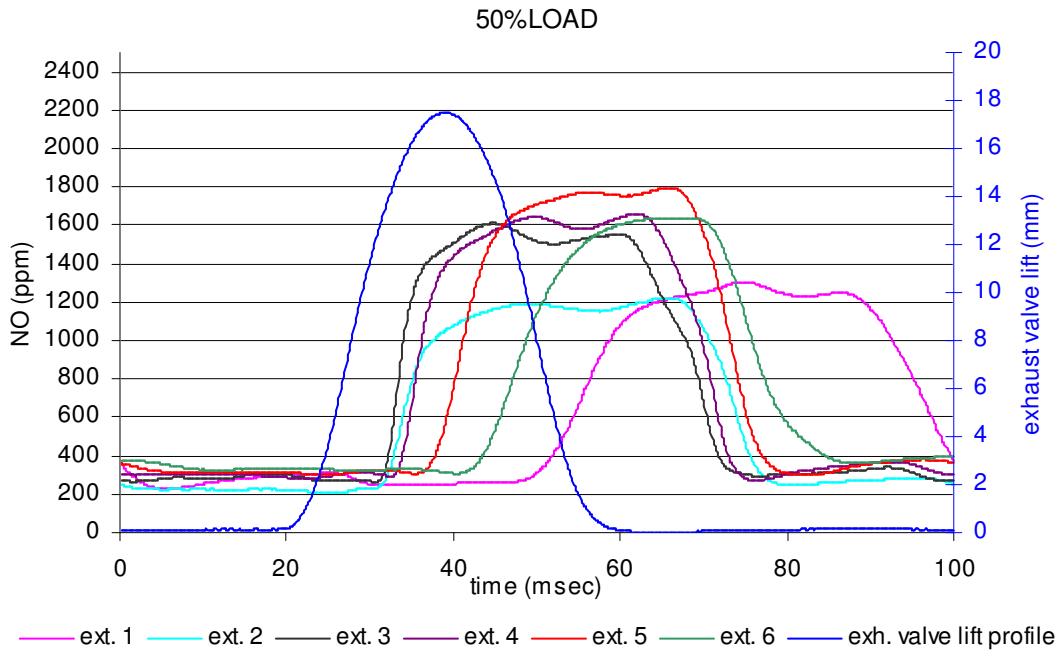
Τα αποτελέσματα που παρατίθενται για τις 6 επεκτάσεις αποτελούν το μέσο όρο 50 κύκλων μετρήσεων, σε κάθε φορτίο του κινητήρα. Για καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων ως προς τις κρίσιμες χρονικές παραμέτρους, το χρόνο ανύψωσης (RT) και το χρόνο καθυστέρησης (DT), τα διαγράμματα στο σχήμα 5.3 παρουσιάζουν την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε NO συναρτήσει του χρόνου που διαρκεί ένας κύκλος λειτουργίας (720°).



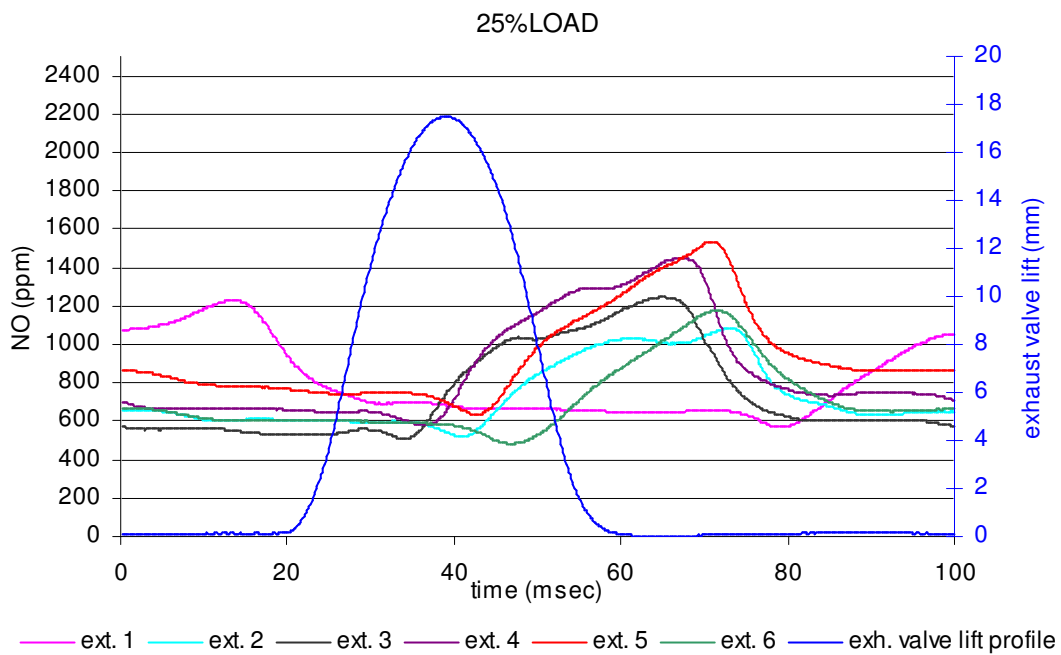
Σχήμα 5.3α— Μετρήσεις NO στον κινητήρα με τις 6 επεκτάσεις, σε φορτίο 90%



Σχήμα 5.3β— Μετρήσεις NO στον κινητήρα με τις 6 επεκτάσεις, σε φορτίο 75%



Σχήμα 5.3γ– Μετρήσεις NO στον κινητήρα με τις 6 επεκτάσεις, σε φορτίο 50%



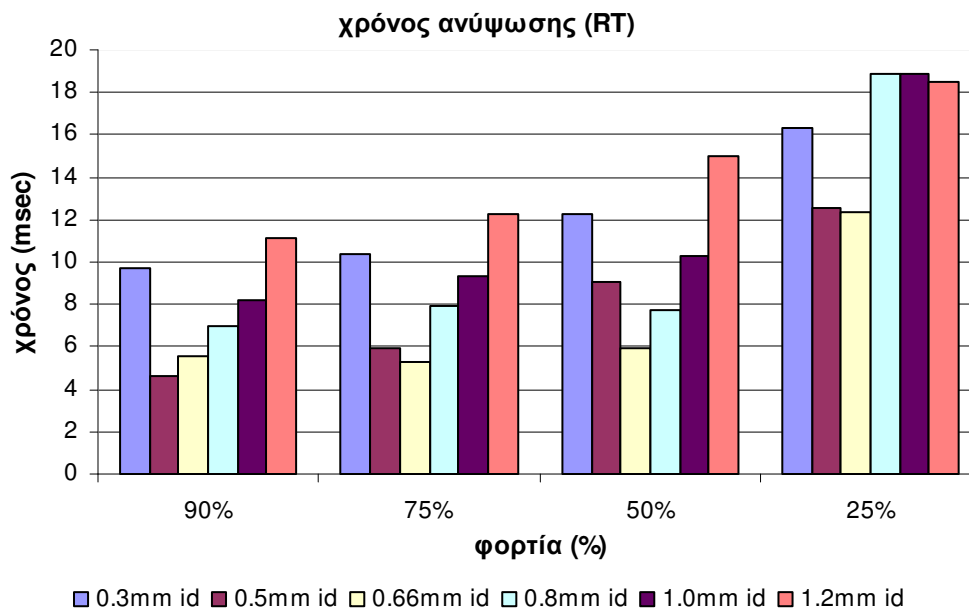
Σχήμα 5.3δ– Μετρήσεις NO στον κινητήρα με τις 6 επεκτάσεις, σε φορτίο 25%

Οι κρίσιμες χρονικές παράμετροι που υπολογίστηκαν παρατίθενται στον πίνακα 5.1

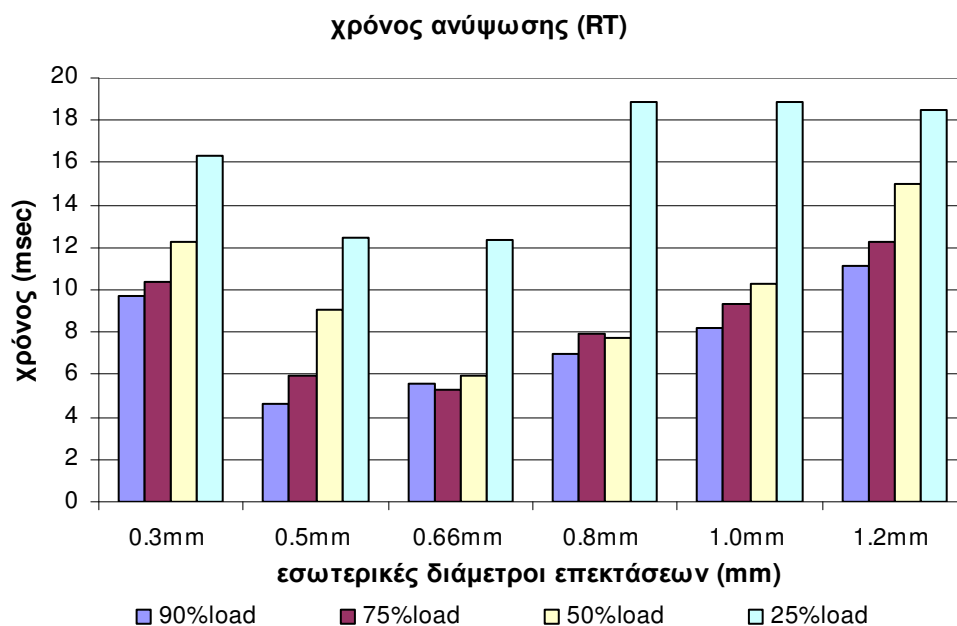
Φορτίο (%)	Χρόνοι απόκρισης (msec)	επέκταση 1 (0.30mm)	επέκταση 2 (0.50mm)	επέκταση 3 (0.66mm)	επέκταση 4 (0.80mm)	επέκταση 5 (1.00mm)	επέκταση 6 (1.20mm)
90	DT	13.51	11.57	11.29	13.79	17.12	18.93
	RT	9.72	4.58	5.56	6.94	8.19	11.11
75	DT	15.18	11.01	11.43	12.68	16.71	21.01
	RT	10.42	5.97	5.28	7.92	9.31	12.22
50	DT	30.59	11.98	11.98	13.79	18.09	23.93
	RT	12.22	9.03	5.97	7.78	10.28	15.00
25	DT	62.91	23.23	16.29	19.07	25.32	29.62
	RT	16.36	12.50	12.39	18.83	18.89	18.47

Πίνακας 5.1 – Χρόνοι απόκρισης για τις 6 επεκτάσεις, στα 4 φορτία του κινητήρα

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του πίνακα 5.1, στα σχήματα 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται διαγράμματα που αναπαριστούν το χρόνο ανύψωσης της κάθε επέκτασης, στα διάφορα φορτία. Στο σχήμα 5.4, παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα των 6 επεκτάσεων για το κάθε ένα από τα 4 φορτία του κινητήρα που εξετάστηκαν, ενώ στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι χρόνοι ανύψωσης της κάθε επέκτασης στα 4 φορτία.



Σχήμα 5.4 – Χρόνοι ανύψωσης των 6 επεκτάσεων, στα 4 φορτία του κινητήρα



Σχήμα 5.5 – Χρόνοι ανύψωσης για τα 4 φορτία του κινητήρα

Από το σχήμα 5.5, είναι φανερό ότι οι 6 επεκτάσεις παρουσίασαν περίπου σταθερή συμπεριφορά στην πτώση της πίεσης των καυσαερίων, η οποία ήταν συνεπαγόμενη της μείωσης του φορτίου του κινητήρα. Με την πτώση της πίεσης παρουσιάστηκε άνοδος του χρόνου ανύψωσης, γεγονός που αναμενόταν σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την θεωρητική ανάλυση και τις δοκιμές στην πειραματική διάταξη που προηγήθηκαν.

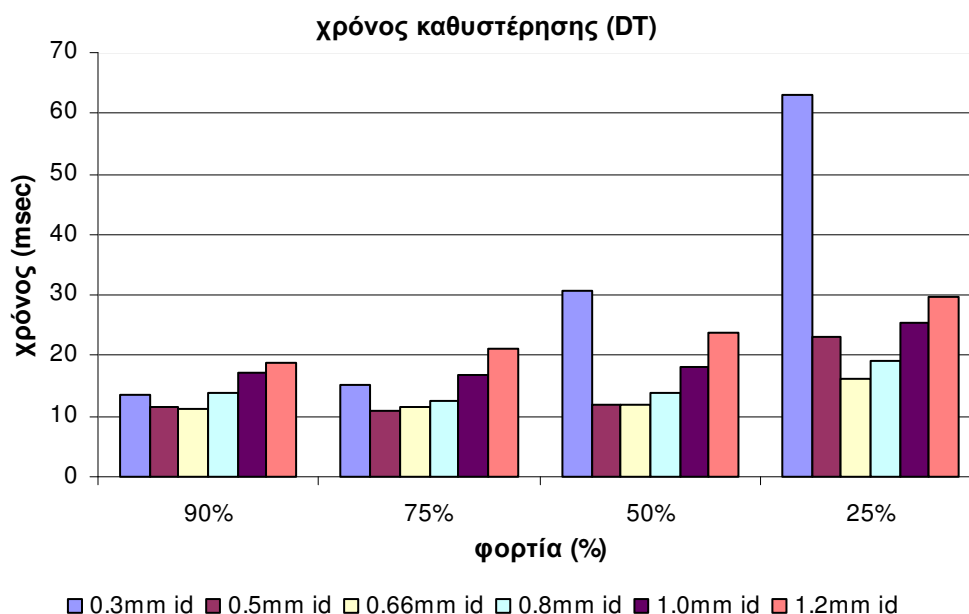
Αναφορικά με τις επεκτάσεις τις μεγαλύτερες της πρότυπης (επεκτάσεις 4,5 και 6), παρατηρείται ότι οι χρόνοι σε κάθε φορτίο αυξάνονται με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου και επιβεβαιώνεται ότι η βέλτιστη διάμετρος από αυτές, είναι εκείνη της επέκτασης 3 (0.66mm). Η επέκταση 1, με εσωτερική διάμετρο 0.3mm, παρουσιάζει φανερά χειρότερη απόκριση από την επέκταση 3 και προς εξέταση είναι τα αποτελέσματα της επέκτασης 2, οι χρόνοι της οποίας είναι παραπλήσιοι εκείνων της επέκτασης 3 στα υψηλότερα φορτία. Από τους υπολογισμούς του πίνακα 5.1, φαίνεται ότι η επέκταση 2 είχε μικρότερο χρόνο ανύψωσης από την επέκταση 3 στο υψηλότερο φορτίο που εξετάστηκε, ενώ στα υπόλοιπα φορτία, η παράμετρος αυτή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της επέκτασης 3. Παρατηρώντας όμως το σχήμα 5.3, όπου παρουσιάζονται γραφικά οι μετρήσεις των NO σε ένα κύκλο λειτουργίας για τις 6 επεκτάσεις, παρατηρείται ότι οι επεκτάσεις 1 και 2 αδυνατούσαν σε κάθε φορτίο να δώσουν την περιεκτικότητα που επιτύγχαναν οι υπόλοιποι δειγματολήπτες.

Είναι βέβαια φανερό ότι υπάρχει διαφορά στη συγκέντρωση που μετρήθηκε από τις 6 επεκτάσεις στα ίδια φορτία, γεγονός που οφείλεται στην υψηλή ευαισθησία του μετρητικού μηχανήματος στις αυξομειώσεις της πίεσης, οι οποίες προκαλούν απόκλιση από την αρχική βαθμονόμηση, όπως και στην ακρίβεια του αναλυτή (παράρτημα 1). Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρήθηκε στην τράπεζα δοκιμών, διότι οι συνθήκες ήταν ελεγχόμενες και η μέτρηση ακαριαία. Σε αντίθεση, οι μετρήσεις στον κινητήρα υποβάλλουν το μηχάνημα σε κυκλική φόρτιση, με μεγάλες αυξομειώσεις της πίεσης και οι δυσμενείς αυτές συνθήκες, προκαλούν την απόκλιση στη συγκέντρωση.

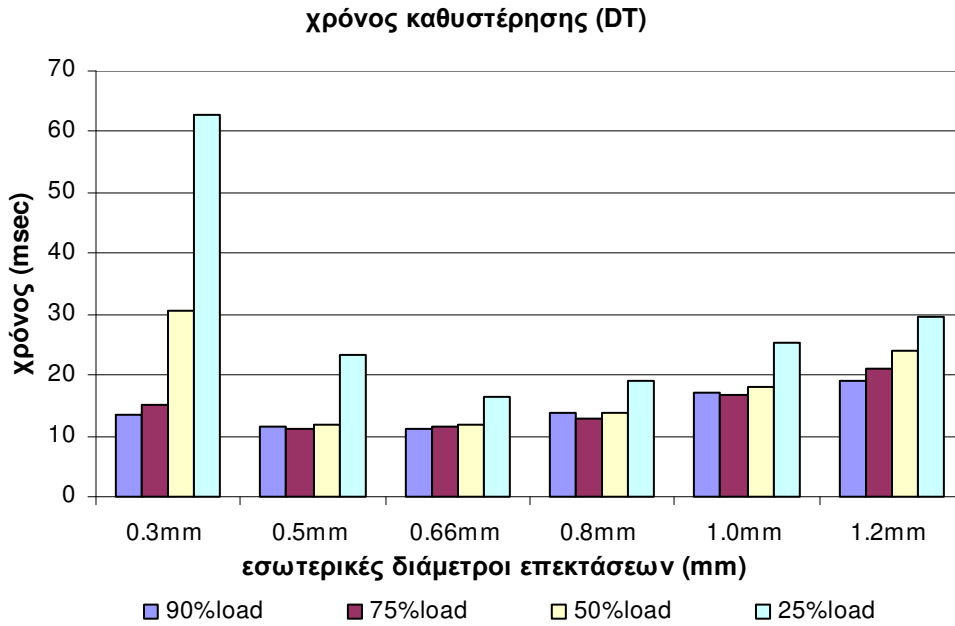
Παρ'όλα αυτά οι επεκτάσεις 1 και 2 παρουσίασαν, κυρίως στα 3 πρώτα φορτία (90%, 75% και 50%) σημαντικά χαμηλότερη περιεκτικότητα από τις υπόλοιπες επεκτάσεις, γεγονός που καθιστά τις μετρήσεις αυτών αναξιόπιστες.

Συνεπώς, η επέκταση 3 παρουσίασε και σε αυτή τη φάση της μελέτης τα καλύτερα αποτελέσματα, με αξιοσημείωτο το γεγονός ότι στα τρία υψηλότερα φορτία έδωσε σχεδόν σταθερούς χρόνους, όπως και στις μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει σημαντική εξάρτηση από την πίεση εισόδου των καυσαερίων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής.

Αναφορικά με το χρόνο καθυστέρησης (DT), παρατίθενται στη συνέχεια, στο σχήμα 5.6, τα συγκριτικά διαγράμματα με τα αποτελέσματα των 6 δειγματοληπτών.



Σχήμα 5.6 – Χρόνοι καθυστέρησης των 6 επεκτάσεων, στα 4 φορτία του κινητήρα



Σχήμα 5.7 – Χρόνοι καθυστέρησης για τα 4 φορτία του κινητήρα

Ο χρόνος καθυστέρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7, παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά με το χρόνο ανύψωσης στα διάφορα φορτία, έχοντας μικρή άνοδο με την σταδιακή πτώση της πίεσης των καυσαερίων.

Η επέκταση 3 έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς αυτήν την παράμετρο, με μεγάλο ενδιαφέρον να παρουσιάζει η επέκταση 1, η οποία είχε σημαντική αύξηση του χρόνου καθυστέρησης στα χαμηλότερα φορτία που εξετάστηκαν. Από τα διαγράμματα στο σχήμα 5.3, γίνεται φανερή η σημαντική μετατόπιση της καμπύλης με τη μείωση του φορτίου, με αποτέλεσμα στο 25% του φορτίου του κινητήρα, να καθυστερεί σχεδόν ένα κύκλο λειτουργίας. Οι επεκτάσεις 2, 3, 4 και 5 έδωσαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, με βέλτιστη την επέκταση 3, αφού οι χρόνοι τους στα 3 υψηλότερα φορτία παρέμειναν περίπου σταθεροί.

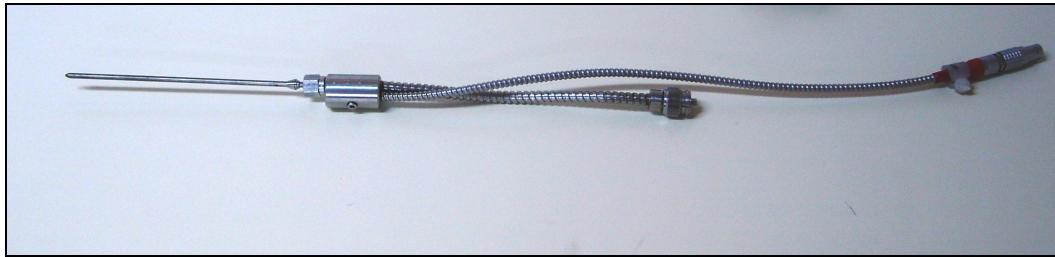
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση που προηγήθηκε οδήγησε σε σαφή συμπεράσματα αναφορικά με τις επεκτάσεις 1,2,5 και 6, με διαμέτρους 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm και 1.2mm, αντίστοιχα. Η βέλτιστη διάμετρος φαίνεται να είναι της επέκτασης 3 (0.66mm), ενώ αρκετά ικανοποιητικά ήταν και τα αποτελέσματα της επέκτασης 4, με εσωτερική διάμετρο 0.8mm.

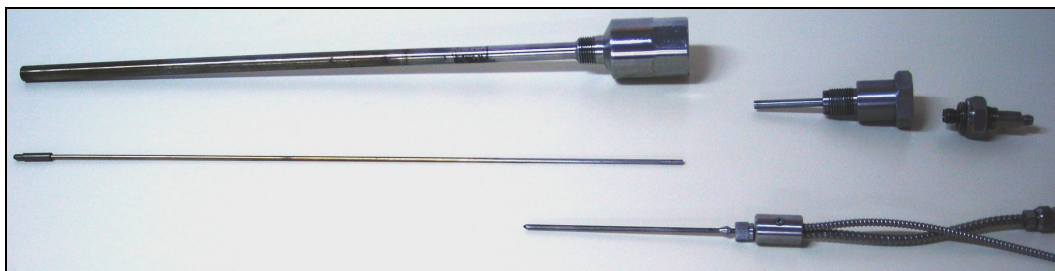
Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, αποφασίστηκε να διερευνηθεί ένας ενιαίος εκτεταμένος δειγματολήπτης, εσωτερικής διαμέτρου 0.66 mm. Στόχος ήταν να εξεταστεί η επίπτωση της συναρμογής δύο μερών στην ακρίβεια των μετρήσεων, δηλαδή να εξακριβωθεί η καλή ή όχι λειτουργία του μοντέλου που στηρίζεται στην προσαρμογή επέκτασης στον πρότυπο δειγματολήπτη. Επιπλέον, το μήκος του δειγματολήπτη επιλέχθηκε 100mm μικρότερο (550mm), από το μήκος των δειγματοληπτών με τις επεκτάσεις (650mm), με σκοπό να διερευνηθεί και αυτή η παράμετρος αναφορικά με τους χρόνους απόκρισης.

Ο δειγματολήπτης που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε κατόπιν παραγγελίας, από την Cambustion Ltd. Για τη στήριξη και προστασία του δειγματολήπτη κατά τις δοκιμές, έγινε λεπτομερής σχεδιασμός εξωτερικού αγωγού στήριξης, όπου στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε από την εταιρεία Omega. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος διατίθενται στο παράρτημα 4.

Στις εικόνες 6.1α , 6.1β και 6.1γ απεικονίζονται ο πρότυπος δειγματολήπτης της Cambustion, ο δειγματολήπτης με την επέκταση 3 και ο ενιαίος εκτεταμένος δειγματολήπτης, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1α – Πρότυπος δειγματολήπτης της Cambustion Ltd. (L=150mm)



Σχήμα 6.1β – Δειγματολήπτης με την επέκταση 3 (εξάρμωση – άρμωση)



Σχήμα 6.1γ – Ενιαίος εκτεταμένος δειγματολήπτης (εξάρμωση – άρμωση)

6.1 Διερεύνηση εκτεταμένου δειγματολήπτη στην τράπεζα δοκιμών

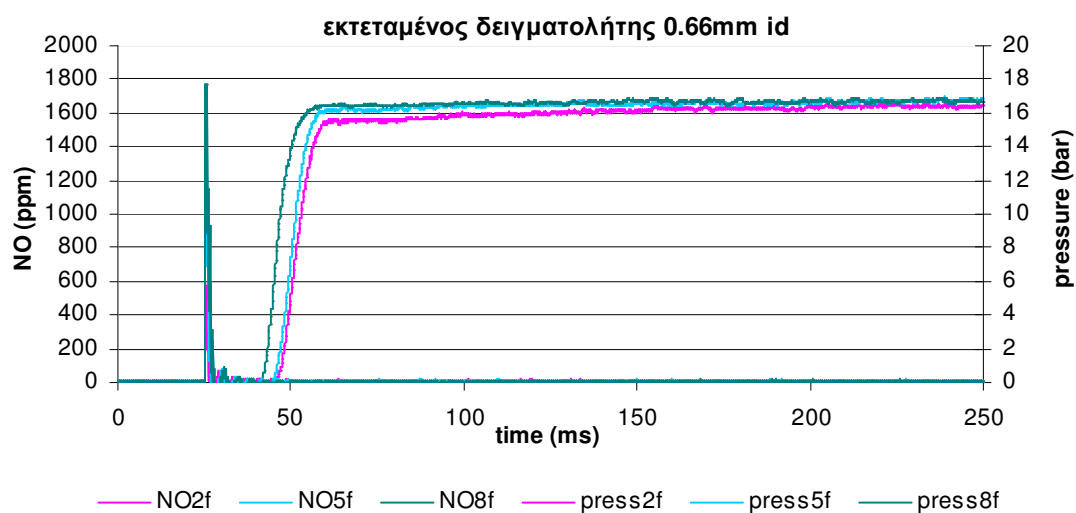
Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του εκτεταμένου δειγματολήπτη.

δειγματολήπτης	υλικό	μήκος (mm)	εσωτερική διάμετρος(mm)	εξωτερική διάμετρος(mm)
ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟΣ δειγματολήπτης Combustion	ανοξειδωτος χάλυβας	550	0.66	3.176

Πίνακας 6.1 – Βασικά χαρακτηριστικά του ενιαίου εκτεταμένου δειγματολήπτη

Ο δειγματολήπτης εξετάστηκε υπό τις ίδιες συνθήκες, στην πειραματική διάταξη που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1. Όμοια με τις έξι επεκτάσεις, έγινε σειρά δοκιμών με 2,5 και 8 φύλλα αλουμινίου με σκοπό τα αποτελέσματα αυτού να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν ως τώρα.

Στο σχήμα 6.2 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην τράπεζα δοκιμών.



Σχήμα 6.2 – Αποτελέσματα τράπεζας δοκιμών για τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη στις τρεις πιέσεις

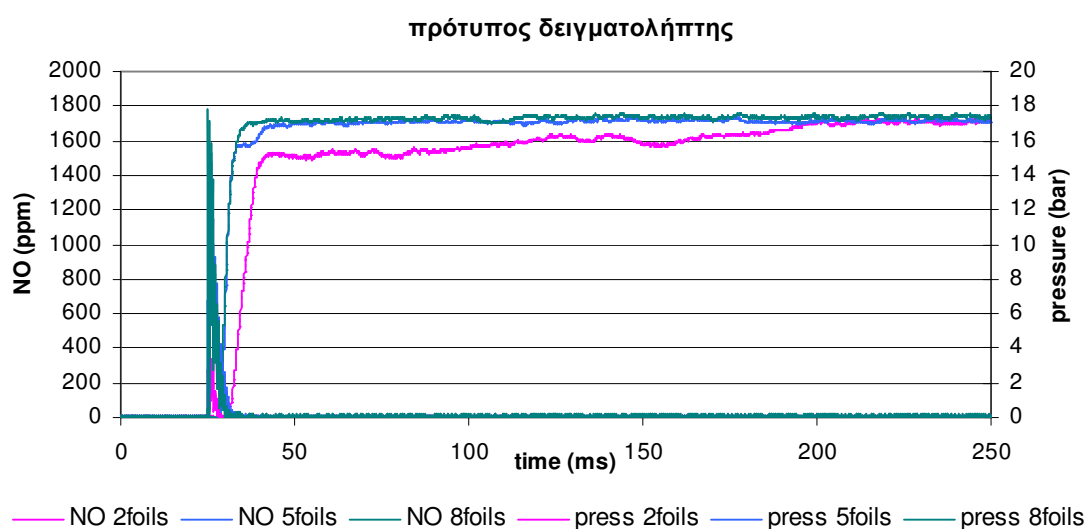
Ο υπολογισμός των κρίσιμων χρονικών παραμέτρων έγινε με τη διαδικασία της παραγράφου 4.2.1.2 και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.2 .

Φύλλα αλουμινίου	Χρόνοι απόκρισης (msec)	εκτεταμένος δειγματολήπτης
2	DT	23.7
	RT	8.2
5	DT	22.4
	RT	7.1
8	DT	18.4
	RT	6.8

Πίνακας 6.2 – Χρόνοι απόκρισης για τον εκτεταμένο δειγματολήπτη από μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών

Από το διάγραμμα του σχήματος 6.2, παρατηρείται ότι ο δειγματολήπτης αυτός είχε μικρό χρόνο απόκρισης, όπως φανερώνει η αρκετά απότομη κλίση των καμπυλών του διαγράμματος, που αντιστοιχούν στην αύξηση της τιμής της περιεκτικότητας σε NO, και σταθερή συμπεριφορά στα διάφορα φορτία, κάτι που φαίνεται από την ομοιότητα και την σύγκλιση των καμπυλών. Πιο αναλυτικά, εξετάζοντας τις χρονικές παραμέτρους του πίνακα 6.2, παρατηρείται ότι τόσο οι χρόνοι καθυστέρησης (DT) όσο και οι χρόνοι ανύψωσης (RT), παρουσιάζουν μικρές διαφορές αυξανόμενης της πίεσης εισόδου του δείγματος.

Για την περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ακολούθως (σχήμα 6.3) παρουσιάζεται αντίστοιχη σειρά δοκιμών για τον πρότυπο δειγματολήπτη, μήκους 150mm και ίδιας διαμέτρου, καθώς και οι χρονικές παράμετροι που αντιστοιχούν στα πειράματα που εκτελέστηκαν (πίνακας 6.3).



Σχήμα 6.3 – Αποτελέσματα τράπεζας δοκιμών για τον πρότυπο δειγματολήπτη στις τρεις πιέσεις

Φύλλα αλουμινίου	Χρόνοι απόκρισης (msec)	πρότυπος δειγματολήπτης
2	DT	7.4
	RT	6.3
5	DT	4.1
	RT	3.1
8	DT	3.9
	RT	2.8

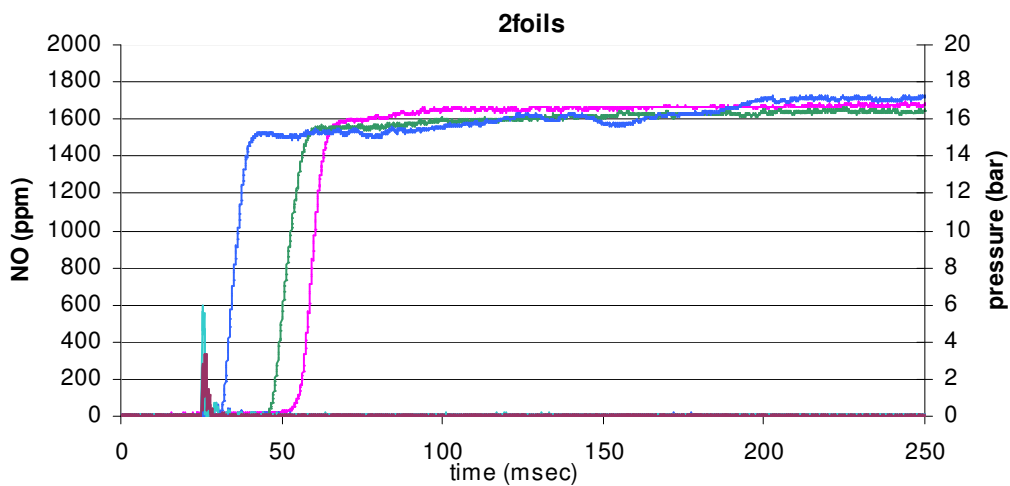
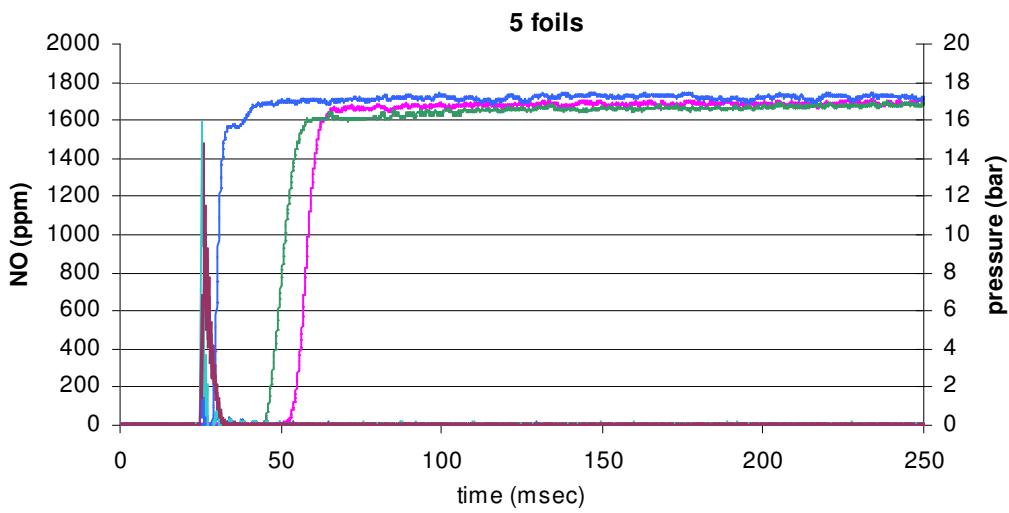
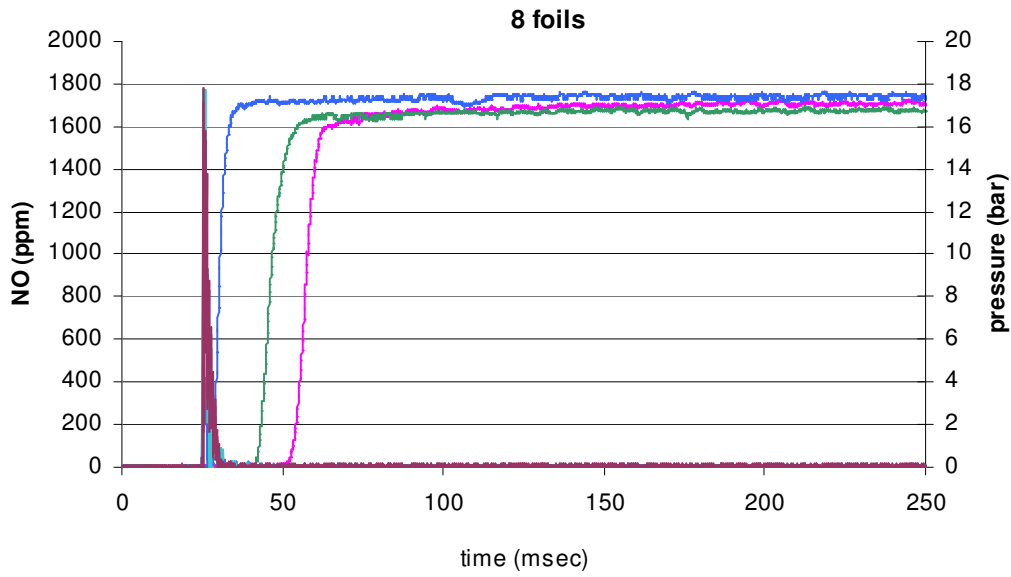
Πίνακας 6.3 – Χρόνοι απόκρισης για τον πρότυπο δειγματολήπτη από μετρήσεις στην τράπεζα δοκιμών

Στο σχήμα 6.3 απεικονίζεται η απόκριση του πρότυπου δειγματολήπτη στις τρεις πιέσεις δοκιμών. Ο χρόνος καθυστέρησης (DT) είναι σχεδόν μηδενικός λόγω της μικρής απόστασης που διανύει το δείγμα από την είσοδό του στο δειγματολήπτη ως το θάλαμο χημικής φωταύγειας, όπου γίνεται η μέτρηση, και η απότομη κλίση των καμπυλών υποδεικνύει και αρκετά χαμηλούς χρόνους ανύψωσης. Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.3, η συμπεριφορά του δειγματολήπτη παρουσίασε μεγάλη σταθερότητα και μόνο μικρή επίδραση της μεταβολής της πίεσης, με τους κρίσιμους χρόνους να παραμένουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

Παρ'όλα αυτά, παρατηρείται ότι στη δοκιμή των 2 φύλλων, δοκιμή που αντιστοιχεί σε χαμηλή πίεση, οπότε και στα χαμηλά φορτία του κινητήρα, η μικρή διαδρομή δεν επιτρέπει την πλήρη ανάπτυξη της ροής, επομένως και την επίτευξη της μέγιστης περιεκτικότητας, για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος ανύψωσης (RT) όμως, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3, αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ των ενδείξεων που αντιστοιχούν στο 10% (169ppm) και το 90% (1523ppm) της μέγιστης περιεκτικότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3, η τιμή αυτή (1523ppm) επιτυγχάνεται στην περιοχή όπου η κλίση της καμπύλης των NO είναι ακόμη απότομη. Συνεπώς, κατά τον υπολογισμό του χρόνου ανύψωσης, το φαινόμενο της αλλαγής της κλίσης της καμπύλης πριν την επίτευξη της μέγιστης ένδειξης, εξαλείφεται.

6.1.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων των διάφορων δειγματοληπτών εσωτερικής διαμέτρου 0.66mm

Στη συνέχεια (σχήμα 6.4) παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα γραφικά και υπολογιστικά αποτελέσματα από την τράπεζα δοκιμών για την επέκταση 3, τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη και τον πρότυπο δειγματολήπτη. Από τη σύγκριση αυτή εξήχθησαν σαφή συμπεράσματα για την επίδραση του μήκους στις κρίσιμες χρονικές παραμέτρους.



— NO επέκταση 3 — NO εκτετ.δειγμ. — NO πρότυπος δειγμ.
— press επέκταση 3 — press εκτετ.δειγμ. — press πρότυπος δειγμ.

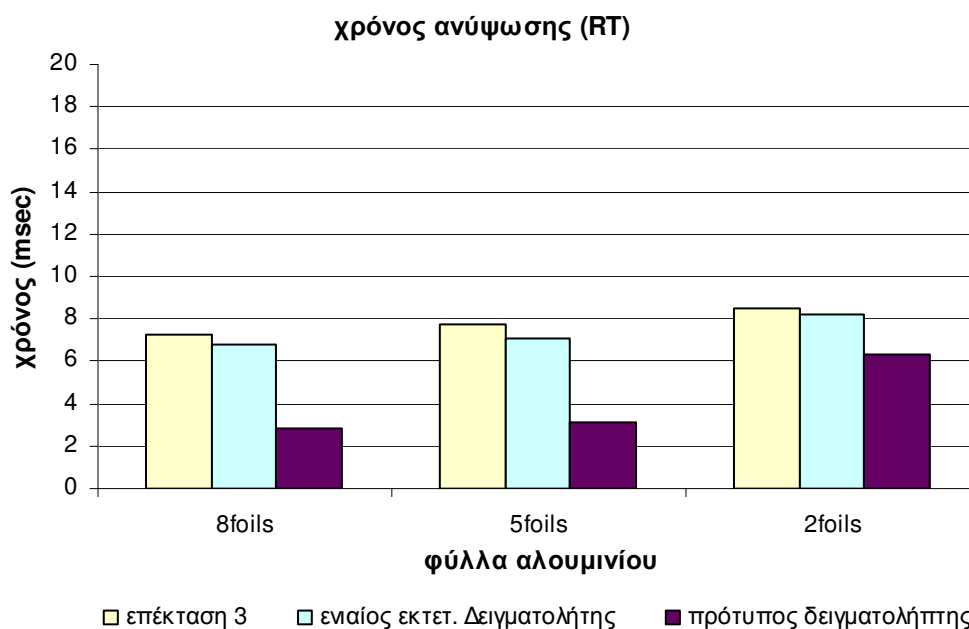
Σχήμα 6.4 – Αποτελέσματα τράπεζας δοκιμών για την επέκταση 3, τον πρότυπο και τον εκτεταμένο δειγματολήπτη στις τρεις πιέσεις

Από τα διαγράμματα του σχήματος 6.4, γίνεται φανερή η μεγάλη επίδραση της μεταβολής του μήκους δειγματοληψίας στον χρόνο καθυστέρησης (DT). Η καμπύλη που αντιστοιχεί στον πρότυπο δειγματολήπτη, προηγείται σημαντικά των άλλων δύο. Παρατηρείται, όμως, ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν περίπου ισαποστάσεις στις τρεις πιέσεις, οπότε και φαίνεται το ανεξάρτητο του χρόνου καθυστέρησης από την πίεση. Η καμπυλότητα δεν παρουσιάζει μεγάλες οπτικές διαφορές, οπότε για την αξιολόγηση των χρόνων ανύψωσης στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται συγκεντρωμένοι οι υπολογισμοί που έγιναν για τους τρεις δειγματολήπτες στις προηγούμενες παραγράφους.

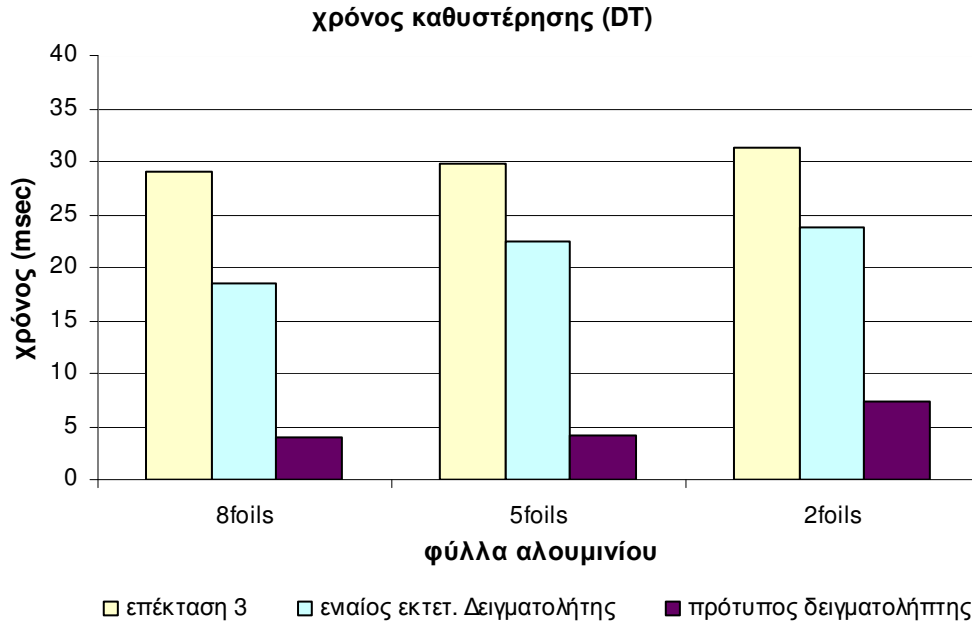
Φύλλα αλουμινίου	Χρόνοι απόκρισης (msec)	επέκταση 3 (650 mm)	εκτεταμένος δειγματολήπτης (550mm)	πρότυπος δειγματολήπτης (150mm)
2	DT	31.3	23.7	7.4
	RT	8.5	8.2	6.3
5	DT	29.8	22.4	4.1
	RT	7.7	7.1	3.1
8	DT	29	18.4	3.9
	RT	7.3	6.8	2.8

Πίνακας 6.4 – Χρόνοι απόκρισης για την επέκταση 3, τον εκτεταμένο και τον πρότυπο δειγματολήπτη

Για ευκολότερη αξιολόγηση των παραπάνω χρονικών παραμέτρων, παρουσιάζονται στη συνέχεια και διαγραμματικά (σχήματα 6.5α και 6.5β).



Σχήμα 6.5α – Χρόνοι ανύψωσης (RT) των τριών δειγματοληπτών ίδιας διαμέτρου (0.66mm)



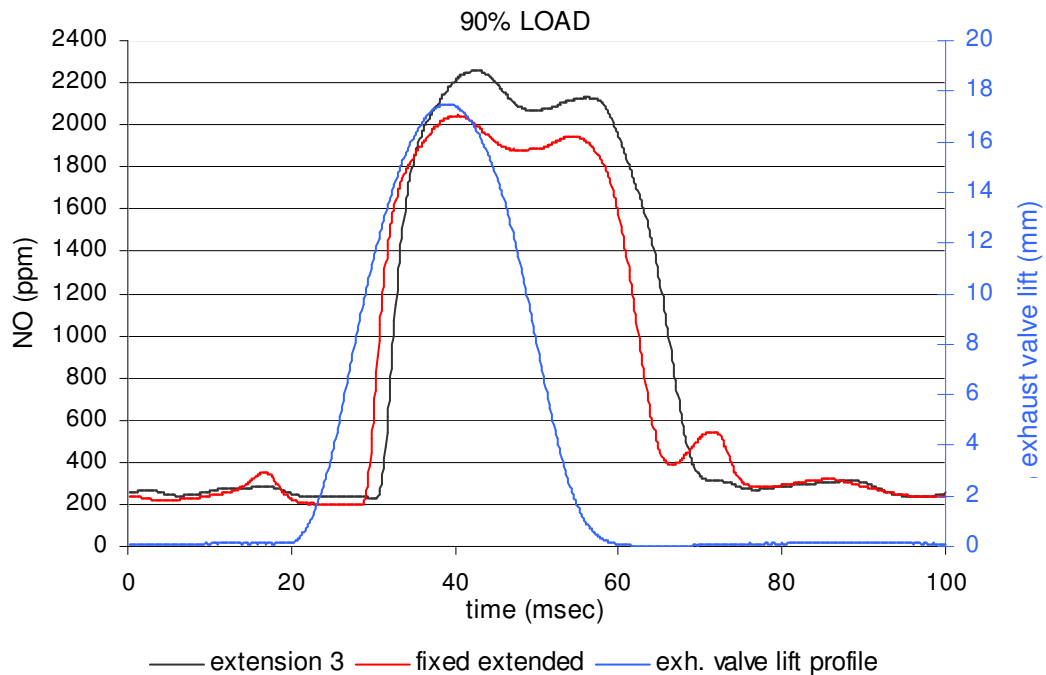
Σχήμα 6.5β – Χρόνοι καθυστέρησης (DT) των τριών δειγματοληπτών ίδιας διαμέτρου (0.66mm)

Από τους υπολογισμένους χρόνους απόκρισης του πίνακα 6.4 και της αναπαράστασης αυτών στο σχήμα 6.5, γίνεται φανερό ότι ο χρόνος ανύψωσης δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την μεταβολή του μήκους δειγματοληψίας και ότι η μεταβολή της διαμέτρου είναι σαφώς μεγαλύτερης βαρύτητας, αναφορικά με αυτή τη χρονική παράμετρο. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας, δεδομένου ότι για μέτρηση σε ναυτικούς κινητήρες αρκετά μεγάλου μεγέθους, το μήκος του δειγματολήπτη ορίζεται από τις ανάγκες της εφαρμογής.

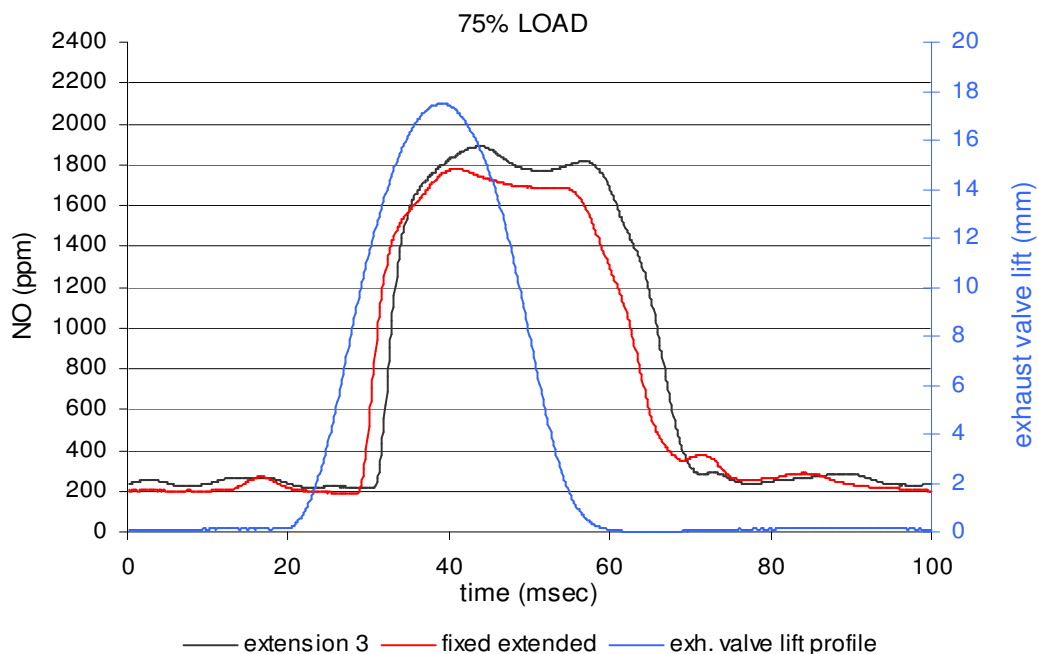
Συμπερασματικά, όσον αφορά το χρόνο καθυστέρησης (DT), η κυρίαρχη παράμετρος είναι το μήκος του δειγματολήπτη. Ο χρόνος αυτός όμως, εφόσον παραμένει σταθερός, όπως παρουσιάστηκε στα πειράματα, δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού μπορεί να θεωρηθεί γνωστός κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η πιο κρίσιμη χρονική παράμετρος είναι ο χρόνος ανύψωσης (RT), ο οποίος επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της διαμέτρου. Η θεωρητική και η πειραματική διερεύνηση έδειξαν ότι παρουσιάζεται βελτιστοποίηση των μετρήσεων σε συγκεκριμένη διάμετρο, την 0.66mm, οπότε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, αυτή η διάμετρος έχει επιλεγεί για οποιαδήποτε κατασκευή δειγματολήπτη.

6.2 Διερεύνηση εκτεταμένου δειγματολήπτη υπό κανονικές συνθήκες καύσης

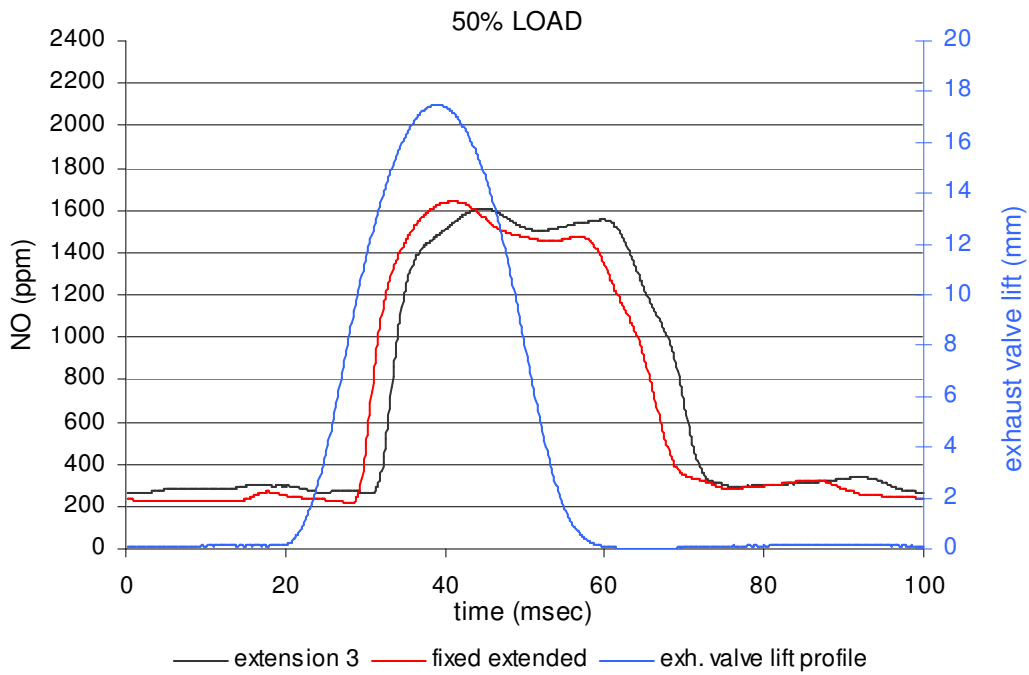
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, η ουσιαστική αξιολόγηση ενός δειγματολήπτη πραγματοποιείται με τη μέτρηση NO υπό κανονικές συνθήκες καύσης, σε ναυτικό κινητήρα. Με τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη, εκτελέστηκαν δοκιμές όμοιες με αυτές που έγιναν για τις 6 επεκτάσεις, τα γραφικά αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στο σχήμα 6.6, μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της επέκτασης 3 για λόγους σύγκρισης.



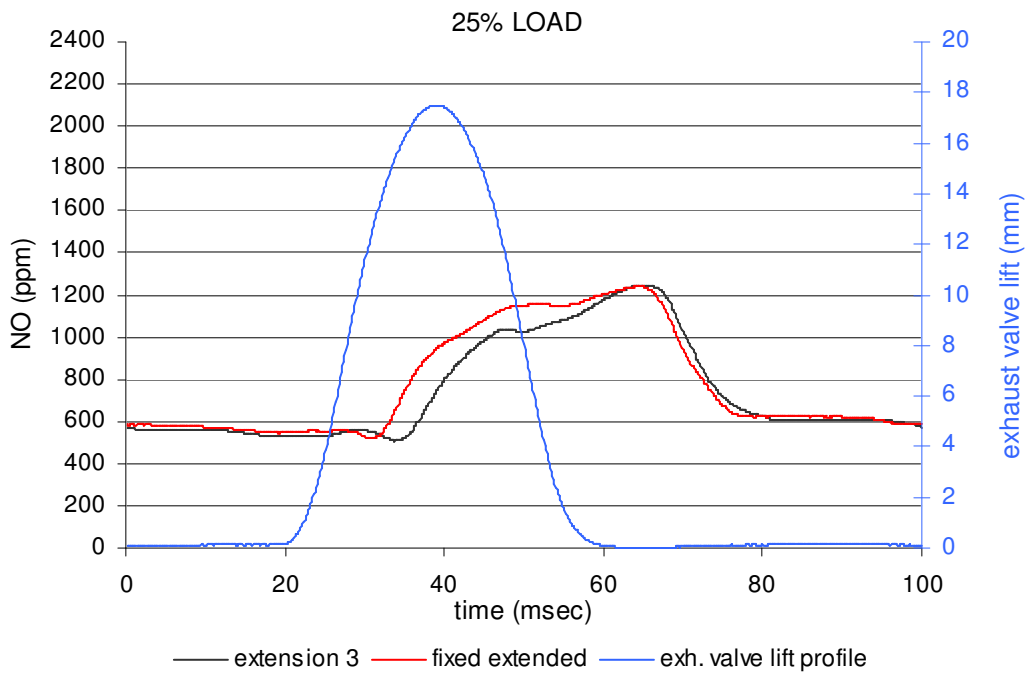
Σχήμα 6.6α – Συγκριτικές μετρήσεις NO με τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη και την επέκταση 3 σε φορτίο 90% του κινητήρα



Σχήμα 6.6β – Συγκριτικές μετρήσεις NO με τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη και την επέκταση 3 σε φορτίο 75% του κινητήρα



Σχήμα 6.6γ – Συγκριτικές μετρήσεις NO με τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη και την επέκταση 3 σε φορτίο 50% του κινητήρα

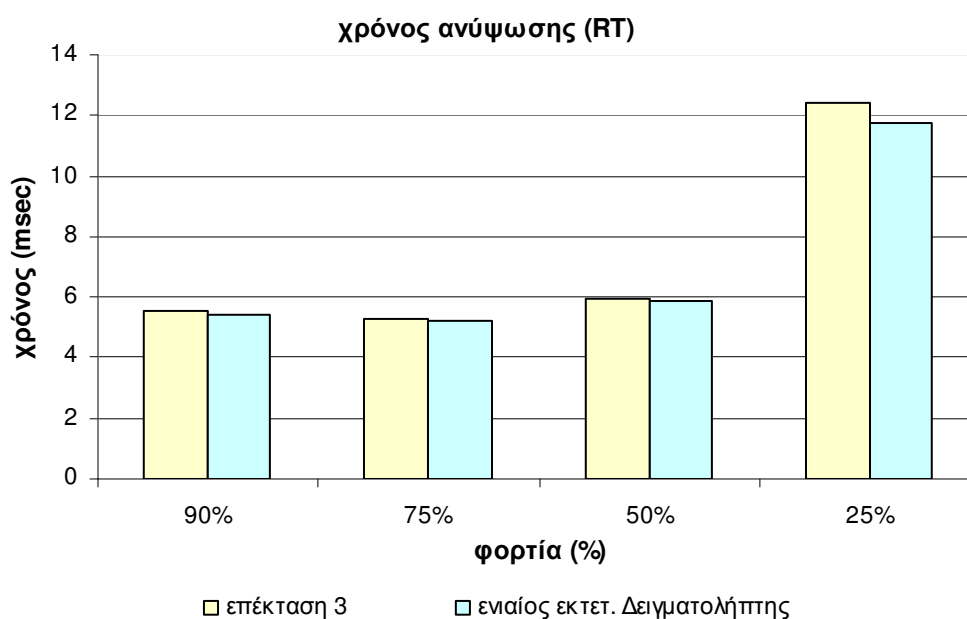


Σχήμα 6.6δ – Συγκριτικές μετρήσεις NO με τον ενιαίο εκτεταμένο δειγματολήπτη και την επέκταση 3 σε φορτίο 25% του κινητήρα

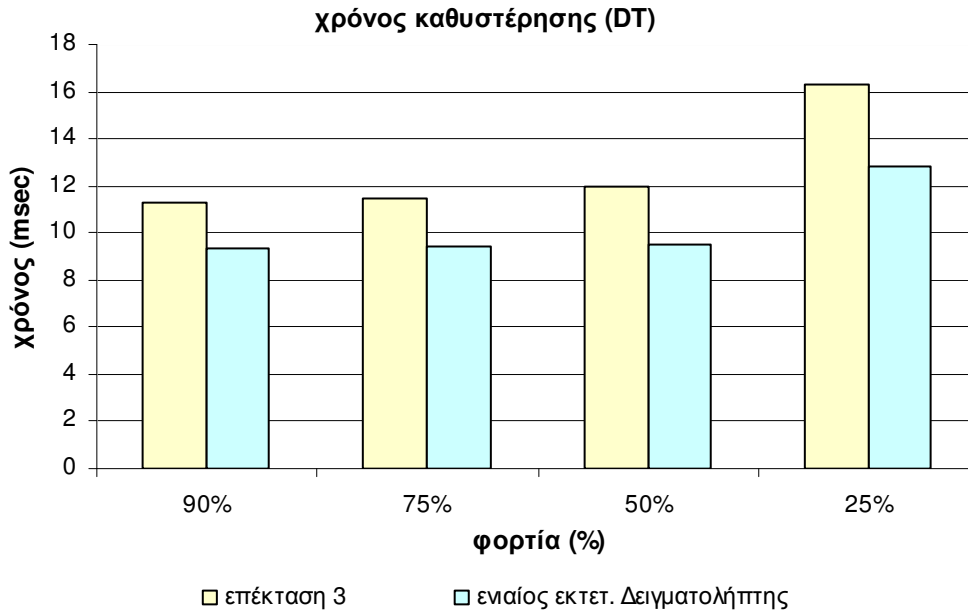
Από τα διαγράμματα του σχήματος 6.6 παρατηρείται ότι οι καμπύλες των ΝΟ από τους δύο δειγματολήπτες για τα 4 φορτία που εξετάστηκαν, παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες. Σε κάθε περίπτωση, η καμπύλη που αντιστοιχεί στη μέτρηση με τον ενιαίο δειγματολήπτη προηγείται, γεγονός που υποδεικνύει το χαμηλότερο χρόνο καθυστέρησης, όπως αναμενόταν από τα προηγούμενα στάδια της μελέτης. Στον πίνακα 6.5 αναφέρονται οι χρονικές παράμετροι των μετρήσεων και στο σχήμα 6.7 η διαγραμματική απεικόνιση αυτών.

Φορτίο (%)	Χρόνοι απόκρισης (msec)	επέκταση 3 (650 mm)	εκτεταμένος δειγματολήπτης (550mm)
90	DT	11.29	9.34
	RT	5.56	5.42
75	DT	11.43	9.44
	RT	5.28	5.25
50	DT	11.98	9.48
	RT	5.97	5.87
25	DT	16.29	12.82
	RT	12.39	11.75

Πίνακας 6.4 – Χρόνοι απόκρισης για την επέκταση 3 και τον εκτεταμένο δειγματολήπτη



Σχήμα 6.7α – Συγκριτική διαγραμματική αναπαράσταση χρόνου ανύψωσης (RT) της επέκτασης 3 και του ενιαίου εκτεταμένου δειγματολήπτη



Σχήμα 6.7β – Συγκριτική διαγραμματική αναπαράσταση χρόνου καθυστέρησης (DT) της επέκτασης 3 και του ενιαίου εκτεταμένου δειγματολήπτη

Τα διαγράμματα του σχήματος 6.7 επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της μελέτης που προηγήθηκε, αφού από το πρώτο διάγραμμα παρατηρείται ότι οι χρόνοι ανύψωσης (RT) σε κάθε φορτίο είναι σχεδόν ίδιοι για τους δύο δειγματολήπτες, ενώ αναφορικά με τον χρόνο καθυστέρησης (DT), ο δειγματολήπτης με το μικρότερο μήκος παρουσιάζει αρκετά βελτιωμένη απόκριση. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι η μεταβολή της διαμέτρου είναι η κυρίαρχη παράμετρος αναφορικά με το χρόνο ανύψωσης, ενώ η μεταβολή του μήκους επιδρά ελάχιστα σε αυτή την χρονική παράμετρο. Αντίθετα, μειώνοντας το μήκος του δειγματολήπτη, βελτιώνεται σημαντικά ο χρόνος καθυστέρησης, ενώ ο χρόνος ανύψωσης παραμένει περίπου σταθερός (για μεταβολή 100mm).

6.3 Συμπεράσματα – Αποτελέσματα

Η ανάλυση σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οδήγησε στην επιλογή βέλτιστων διαστάσεων και συνεπώς, την κατασκευή ενός δειγματολήπτη για ταχεία μέτρηση NO σε ναυτικούς κινητήρες Diesel. Συμπερασματικά, θα πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα:

- Το υλικό κατασκευής που εξετάστηκε ήταν σε κάθε περίπτωση ο ανοξειδωτός χάλυβας. Σε θεωρητικό επίπεδο, εξετάστηκε η περίπτωση διαφορετικού υλικού, μικρότερης επιφανειακής τραχύτητας, όπως είναι το πυριτικό γυαλί (quartz glass). Η μείωση της επιφανειακής τραχύτητας αναμένεται να επιδρά σημαντικά στον αριθμό Reynolds και συνεπώς στον τύπο της ροής. Όπως αναφέρθηκε, για να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία του θαλάμου χημικής φωταύγειας, η ροή πρέπει να είναι τυρβώδης ή τουλάχιστον μεταβατική. Η θεωρητική ανάλυση έδειξε ότι η χρήση γυαλιού δίνει καλύτερα αποτελέσματα από αυτά του ανοξειδωτού χάλυβα. Όμως για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το γυαλί κρίθηκε ότι δεν αποτελεί εφικτή λύση λόγω των δυσμενών συνθηκών που επικρατούν στην περίπτωση μετρήσεων ρύπων υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας των ναυτικών κινητήρων (π.χ. κραδασμοί, συχνή συντήρηση).
- Το μήκος του δειγματολήπτη αποτέλεσε το βασικό περιορισμό και κίνητρο για την διεξαγωγή αυτής της μελέτης. Ο στόχος ήταν να κατασκευαστεί δειγματολήπτης με μήκος που να επαρκεί για την πραγματοποίηση δειγματοληψίας από συγκεκριμένο κύλινδρο, μεγάλου, ναυτικού κινητήρα. Θετικό αποτέλεσμα, που απορρέει από τη θεωρητική και πειραματική ανάλυση που προηγήθηκε, αποτελεί το γεγονός ότι το μήκος του δειγματολήπτη δεν επιδρά σημαντικά στον χρόνο ανύψωσης, αλλά μόνο στον χρόνο καθυστέρησης. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη δημιουργία δειγματοληπτών με μήκος που να προσαρμόζεται ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Στην περίπτωση που εξετάστηκε, ο δειγματολήπτης μήκους 550mm επαρκούσε, διότι ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν τετράχρονος και συνεπώς μικρότερων διαστάσεων από έναν δίχρονο. Για εφαρμογή σε μεγαλύτερους ναυτικούς κινητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί δειγματολήπτης μεγαλύτερου μήκους με εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Η βασική παράμετρος που επηρεάζει την ταχύτητα της δειγματοληψίας, είναι η εσωτερική διάμετρος του δειγματολήπτη. Από τις διαμέτρους που εξετάστηκαν βέλτιστη κρίθηκε η διάμετρος των 0.66mm, ενώ αρκετά καλά αποτελέσματα έδωσε και ο δειγματολήπτης με διάμετρο 0.8mm. Για διαμέτρους μικρότερες και μεγαλύτερες αυτών παρατηρήθηκε αύξηση του χρόνου ανύψωσης.

Επίσης, οι πολύ μικρές διαμέτροι των 0.3mm και 0.5mm, δεν έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στη περιεκτικότητα των οξειδίων του αζώτου που μετρήθηκε. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι οι δειγματολήπτες με διάμετρο μικρότερη των 0.66mm δεν επιτυγχάνουν την παροχή μάζας που απαιτείται για την καλή λειτουργία της μονάδας χημικής φωταύγειας.

- Οι δειγματολήπτες που αναπτύχθηκαν, στηρίχθηκαν σε δύο βασικά μοντέλα. Το πρώτο ήταν η εφαρμογή επέκτασης στον ήδη υπάρχοντα δειγματολήπτη και το δεύτερο, ήταν η κατασκευή ενός ενιαίου εκτεταμένου δειγματολήπτη. Η σύγκλιση των καμπυλών NO που αντιστοιχούν στην επέκταση 3 και τον ενιαίο δειγματολήπτη (ίδιας εσωτερικής διαμέτρου), που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.2, υποδεικνύει ότι το μοντέλο των επεκτάσεων που αναπτύχθηκε ήταν εξίσου αποτελεσματικό.
Συμπέρασμα αυτού είναι ότι σε μελλοντική εφαρμογή, μπορεί να γίνει χρήση επεκτάσεων που προσαρτώνται εύκολα και γρήγορα στον πρότυπο δειγματολήπτη, το κόστος των οποίων είναι πολύ μικρότερο από τον ενιαίο δειγματολήπτη.
- Το ολοκλήρωμα της καμπύλης των NO (σε ένα κύκλο λειτουργίας της μηχανής), ως προς το χρόνο, θα δώσει με κατάλληλους υπολογισμούς τη συνολική παροχή μάζας εκπεμπόμενων NO από συγκεκριμένο κύλινδρο, σε μονάδες gr/kWh. Η παραπάνω διαδικασία και ο υπολογισμός των NO σε gr/kWh, επιτρέπει την άμεση σύγκριση των μετρούμενων εκπομπών με τα θεσμοθετημένα, από τον IMO, όρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ICCT, “Air pollution and greenhouse gas emissions from Ocean – going Ships: Impacts, Mitigation Options and Opportunities for Managing growth”, March 2007.
- [2] Stone R., “Introduction to Internal Combustion Engines”, The MacMillan Press Ltd., second edition, 1992.
- [3] IMO, MARPOL, Annex VI: Prevention of air pollution from Ships, September 1997 (adopted), International Convention for the prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto
- [4] Eco Physics, “CLD 700RE ht, Users Manual”, August 1998
- [5] Cambustion Ltd, “fNOx 400 Fast Response Nitric Oxide Measurement System, User Manual”, version 1.17, 2004.
- [6] Eche R. “The Turbulence Problem, An Experimentalist’s Perspective”, Los Alamos Science, 2005.
- [7] Peckam M., Director of Cambustion Ltd., επικοινωνία με ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, Φεβρουάριος 2009.
- [8] Mc Cabe W.C., Smith J.C., Harriot P., “*Unit Operation of Chemical Engineering*”, McGraw-Hill International Editions, Fifth edition, 1993.
- [9] Romeo, E., Royo, C., Monzón, A., “*Improved explicit equations of the friction factor in rough and smooth pipes*”, University of Zaragoza, Department of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Science, Chemical Engineering Journal, 2001.
- [10] “*Roughness and surface coefficients*”, από την ιστοσελίδα www.engineeringtoolbox.com
- [11] Silva, C.M., Costa, M., Farias, T.L., Santos, H., “Evaluation of SI engine exhaust gas emissions upstream and downstream of the catalytic converter”, Energy Conversion and Management, 2006.
- [12] Hughes, W., Brighton, J., “Shaum’s Outlines: Fluid Dynamics”, McGraw-Hill International Editions, Third edition, 1999.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΝΑΛΥΤΗ

***f* NOx400 Fast Response CLD**

System Components

A full, two-channel *f* NOx400 Fast CLD (see Figure 1) contains the following items:



Figure 1: The main items of a *f* NOx400 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* NO HEAD) 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

Standard operating mode of the *f* NOx400 system

- CP VAC = 350mmHg
- CLD VAC = < 35mmHg (not controlled by a set-point, but this vacuum should be achievable and stable)
- (Sample head) TEMP = 300 °C
- Sample probe Line Heater Controller (LHC) temp = 150 °C
- SPAN/ZERO gas pressure set on DCS calibration system = 2 bar (30psi)

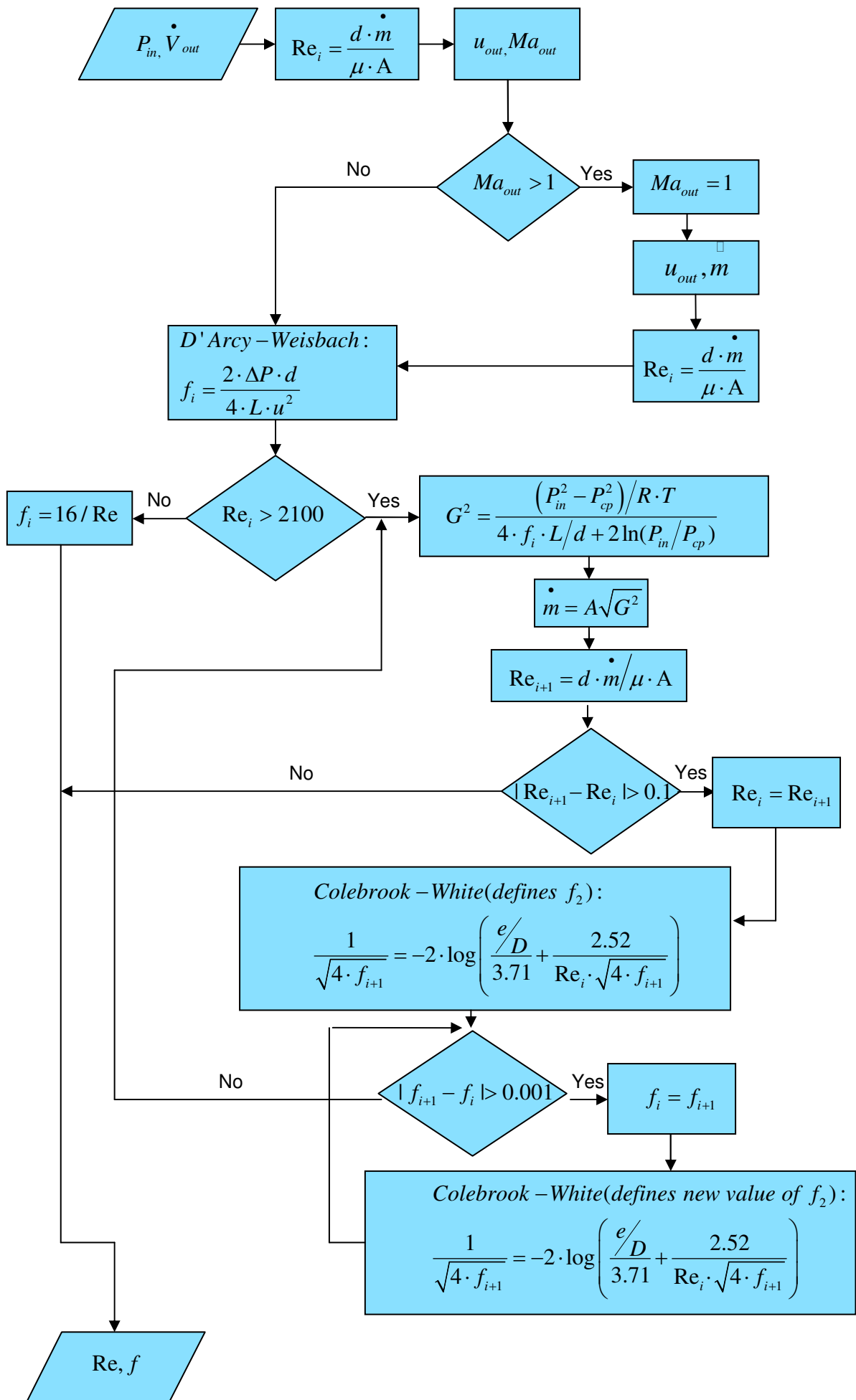
Specification : *f* NOx400

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.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Κώδικας Matlab – υπολογισμός αριθμού Reynolds

Flowchart of Matlab code for Reynolds and friction factor calculation



% REYNOLDS CALCULATION METHOD

clear all

%%%

%The volume rates provided below, for the 3 different pressures were given by the
%manufacturer.

To run each test activate the corresponding command

%All units are S.I units

%%%

%for exhaust pressure 2bar, volume rate (measured in m³/sec) at the exit is :

v_out = 200*10⁽⁻⁶⁾;

%for exhaust pressure 3bar, volume rate (measured in m³/sec) at the exit is:

%v_out = 320*10⁽⁻⁶⁾;

%for exhaust pressure 3.5bar, volume rate (measured in m³/sec) at the exit is:

%v_out = 385*10⁽⁻⁶⁾;

%constant pressure in CP chamber ((measured in Pa)

pcp = 54700;

%cp temp converted to Kelvin from Celsius

t_cp = 150+273;

exhaust_press = input('Enter pressure in exhaust pipe in bar ');

exh_press = double(exhaust_press);

exh_press = exh_press*100000;

tube_diameter = input('Enter tube diameter in mm ');

tube_diam = double(tube_diameter);

tube_diam = tube_diam/1000;

tube_length = input('Enter tube length in mm ');

tube_l = double(tube_length);

tube_l = tube_l/1000;

tube_area = 3.14*tube_diam²/4;

%SS roughness in m

e = 800*10⁽⁻⁹⁾;

r = tube_diam/e;

%gas constant for exhaust gas

R = 287.1;

```

%diameter of exhaust port
port_diam = 0.05;
%area of the exhaust port
port_area = 3.14*port_diam^2/4;

tv = 150/(tube_l*1000);

%volume flow rate calculation at the exit
volume_exit = tv*v_out;
dens_exit = pcp/(R*t_cp);
velocity_exit = volume_exit/tube_area;

%dynamic viscosity of exhaust gases
viscosity = 1.384*10^(-5)+2.68*10^(-8)*t_cp;
mass_tube = velocity_exit*dens_exit*tube_area;
Reynolds = mass_tube*tube_diam/(tube_area*viscosity);
velocity_exit = mass_tube/(dens_exit*tube_area);
Mach_exit = velocity_exit/(1.4*R*t_cp)^(1/2);
if Mach_exit > 1.01
    Mach_exit = 1;
    velocity_exit = (1.4*R*t_cp)^(1/2);
    mass_tube = velocity_exit*dens_exit*tube_area;
    Reynolds = mass_tube*tube_diam/(tube_area*viscosity);
end
density_inlet = exh_press/(R*t_cp);
velocity_inlet = mass_tube/(density_inlet*tube_area);
delta_press = exh_press - pcp;
velocity_av = (velocity_inlet+velocity_exit)/2;

%Darcy Weisbach first estimate
f = (tube_diam*delta_press^2)/(4*tube_l*dens_exit*velocity_av^2);
if Reynolds < 2100.01
    f = 16/Reynolds;
else
    %turbulent flow
    tv_1 = 4*f*tube_l/tube_diam+2*log(exh_press/pcp);
    tv_2 = tv_1*t_cp*R;
    tv_3 = (exh_press^2-pcp^2)/tv_2;
    massflow = tube_area*((tv_3)^(1/2));
    Reynolds_2 = massflow*tube_diam/(tube_area*viscosity);

```

```

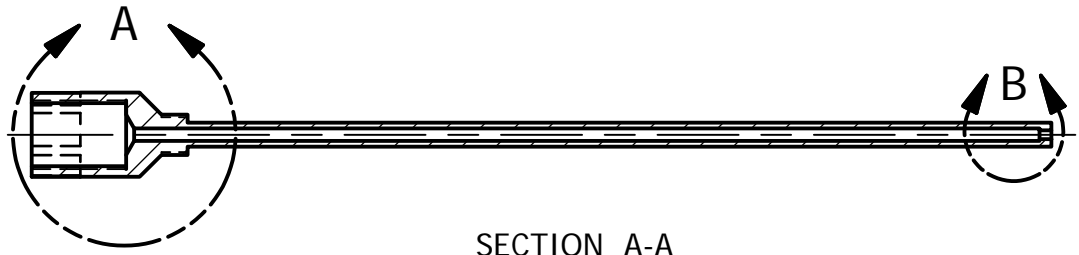
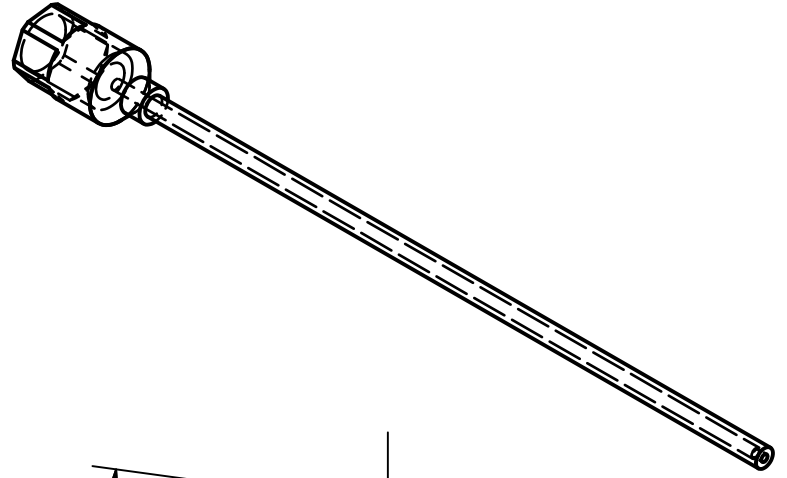
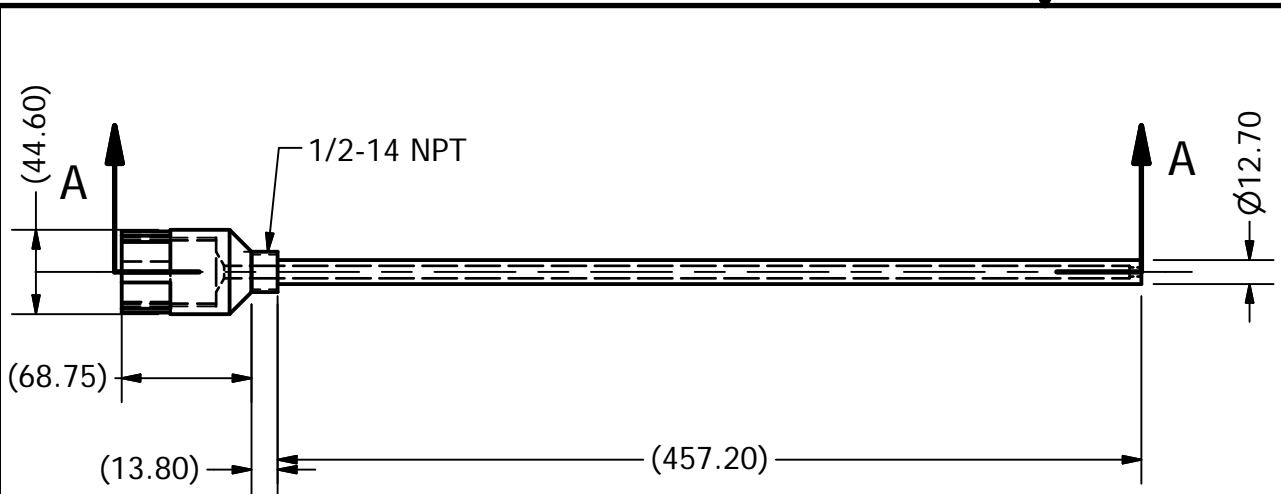
%Iteration for the Reynolds calculation
while abs(Reynolds-Reynolds_2) > 0.01
    Reynolds = Reynolds_2;
    %Colebrook equation for darcy friction factor
    f2 = (1/(-2*log10(((e/tube_diam)/3.71)+2.52/(Reynolds*f^(1/2))))^2;
    %iteration for defining fanning friction factor
    while abs(f-f2) > 0.001
        f = f2;
        f2 = (1/(-2*log10(((e/tube_diam)/3.71)+2.52/(Reynolds*f^(1/2))))^2;
    end
    %fanning friction factor equals to darcy's/4
    f = f2/4;
    tv_1 = 4*f*tube_l/tube_diam+2*log(exh_press/pcp);
    tv_2 = tv_1*t_cp*R;
    tv_3 = (exh_press^2-pcp^2)/tv_2;
    massflow = tube_area*((tv_3)^(1/2));
    Reynolds_2 = massflow*tube_diam/(tube_area*viscosity);
end
Reynolds = Reynolds_2;
end

Reynolds
Mach_exit
f
velocity_exit

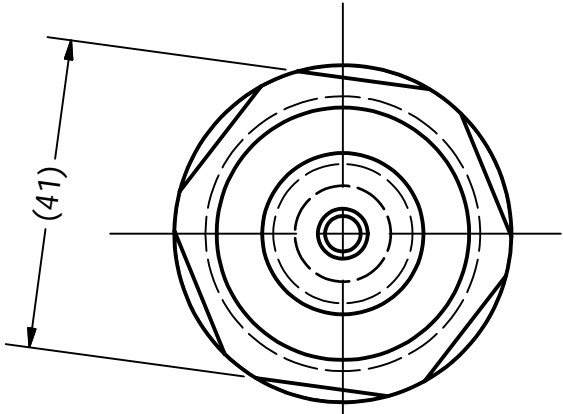
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

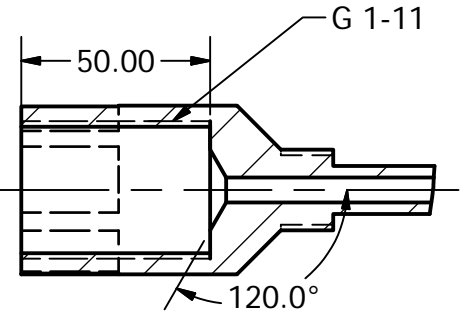
Τεχνικά σχέδια δειγματοληπτών



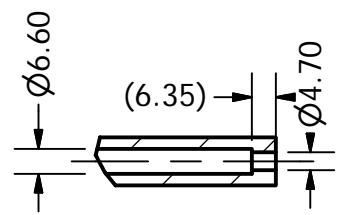
SECTION A-A



SCALE 1 : 1

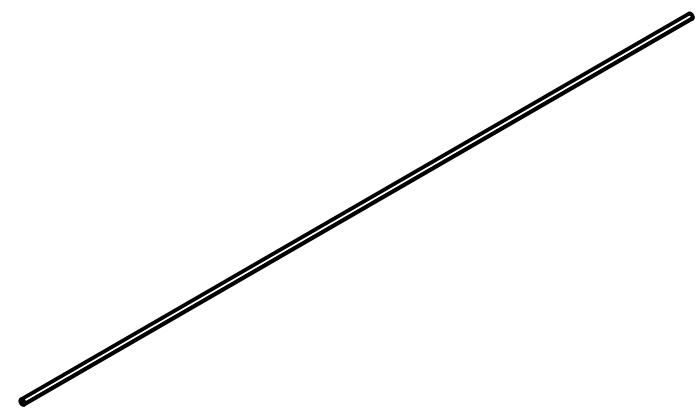
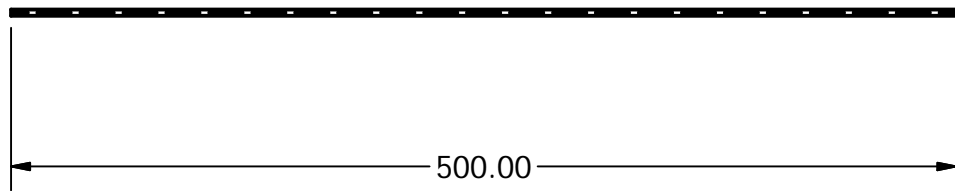


DETAIL A
SCALE 1 / 2

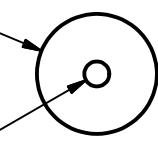


DETAIL B
SCALE 1 / 2

DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	09/2008		
MATERIAL	Stainless Steel	TEXAS Thermowell Probe Housing	
UNITS	mm		
SCALE	1:4	SIZE	DWG NO : 1 / appendix 3
		A4	



Ø3.18(fixed for all extensions)

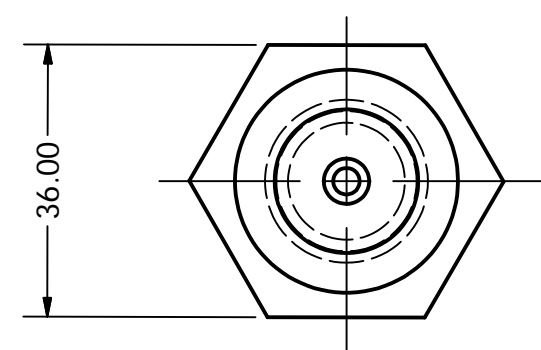
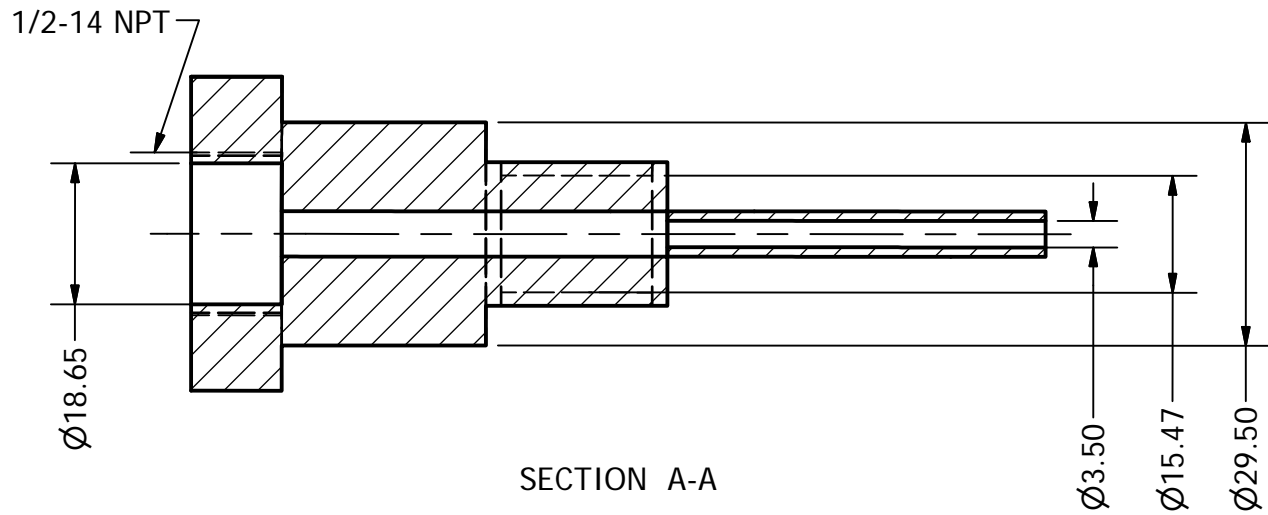
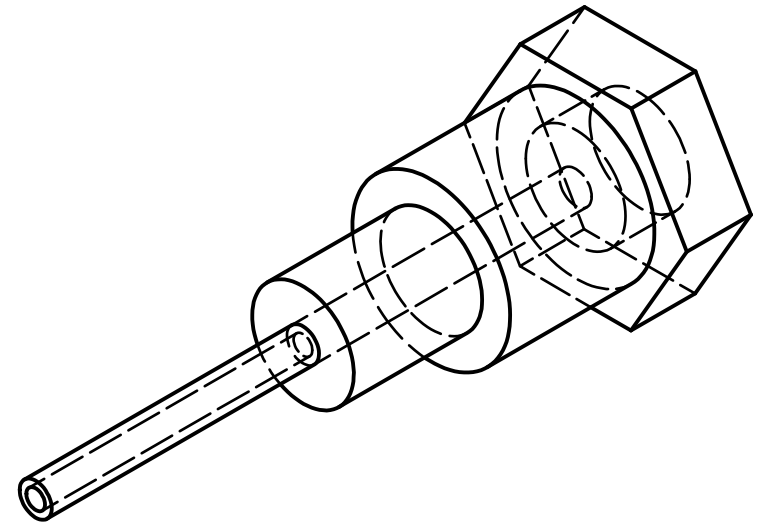
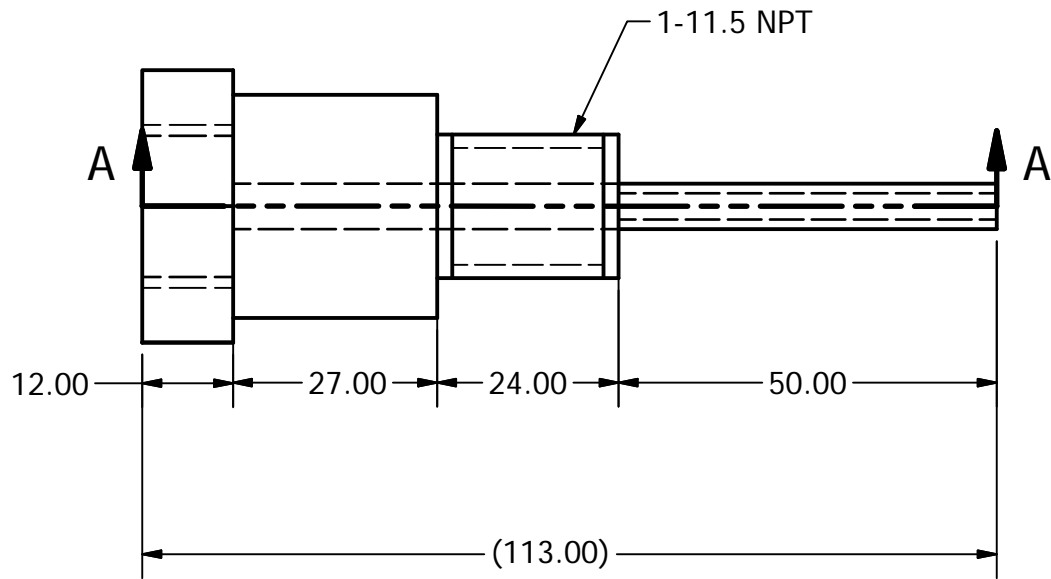


ID : X (varied for the different extensions (see note))

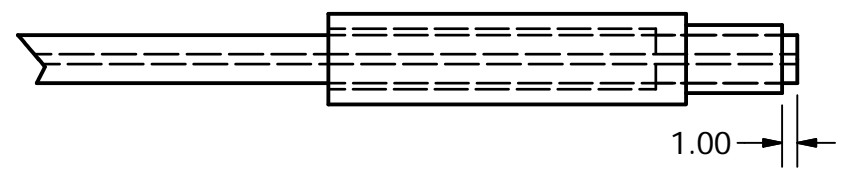
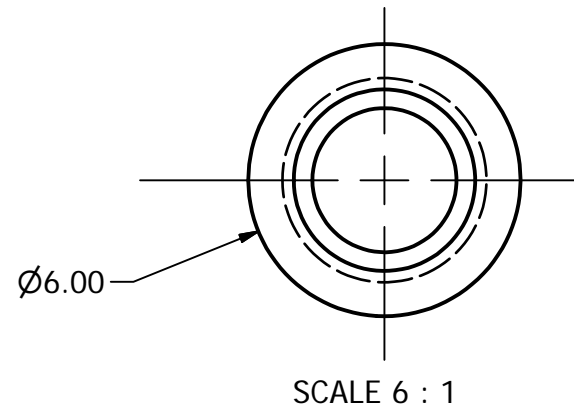
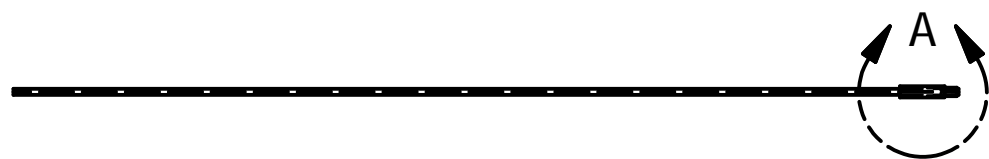
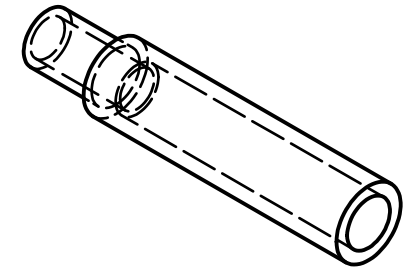
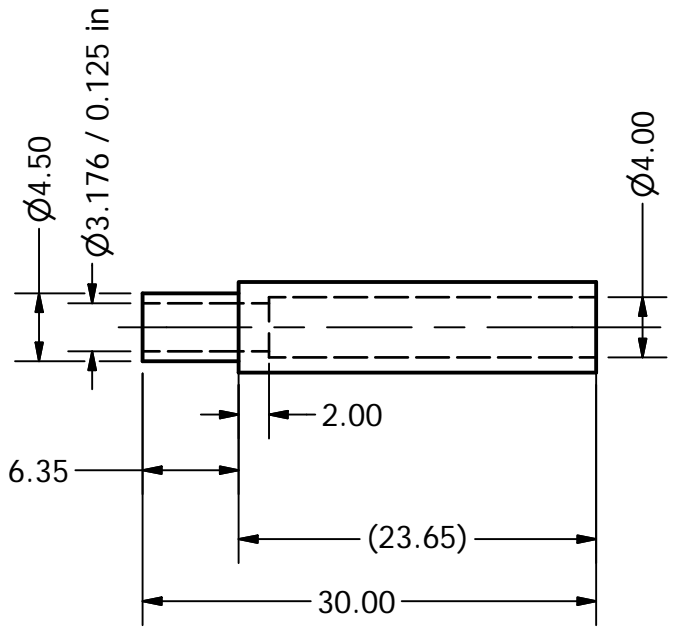
SCALE 5 : 1

NOTE:
X : 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2 mm

DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	09/2008		
MATERIAL	Stainless Steel	Removable Extension (of various IDs)	
UNITS	mm		
SCALE	1:4		
		SIZE A4	DWG NO : 2 / appendix 3

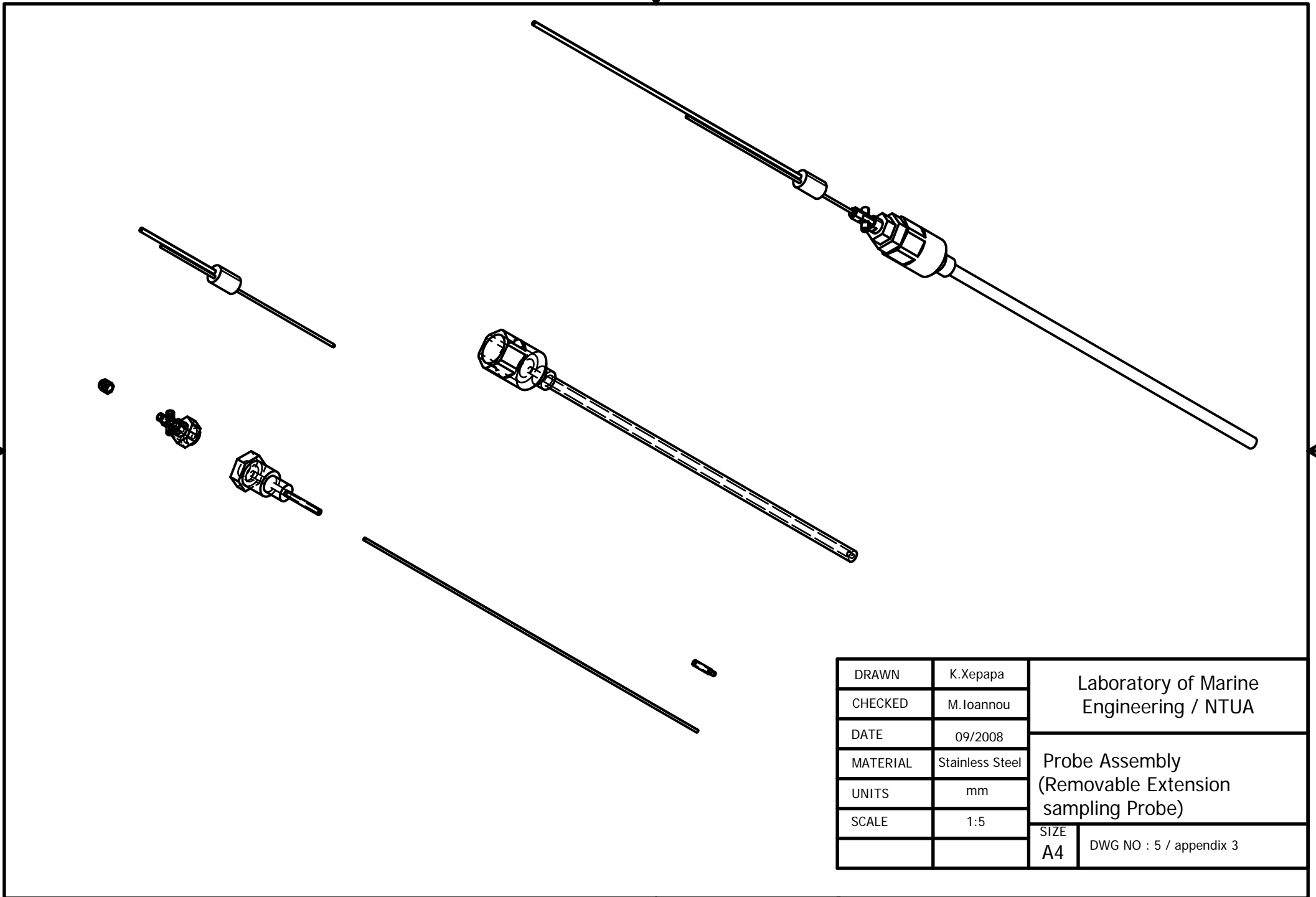


DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	09/2008	Adaptor	
MATERIAL	Stainless Steel		
UNITS	mm		
SCALE	1:1	SIZE	DWG NO : 3 / appendix 3
		A4	

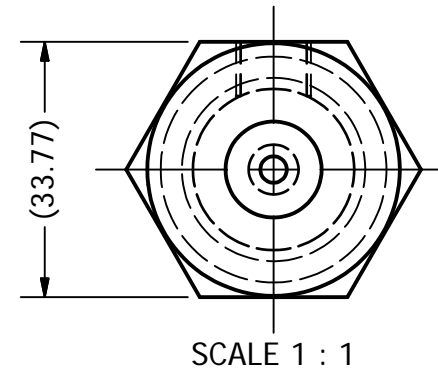
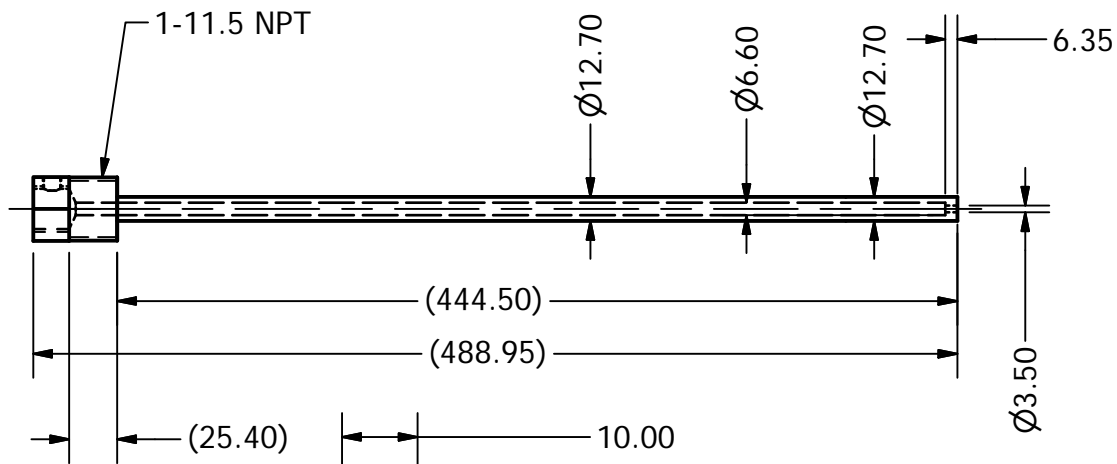
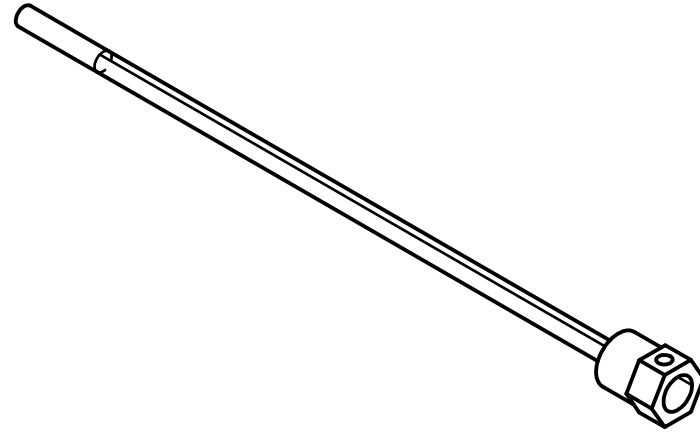


DETAIL A

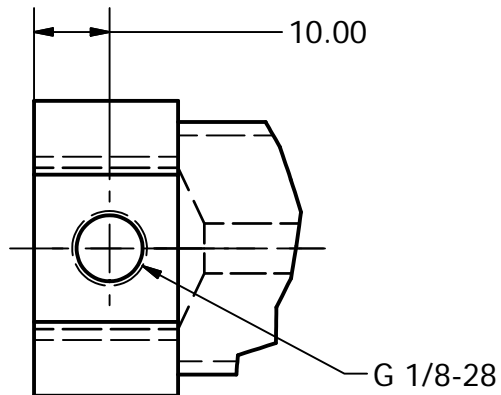
DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	09/2008		
MATERIAL	Stainless Steel	Support Tip	
UNITS	mm		
SCALE	2:1	SIZE	DWG NO : 4 / appendix 3
		A4	



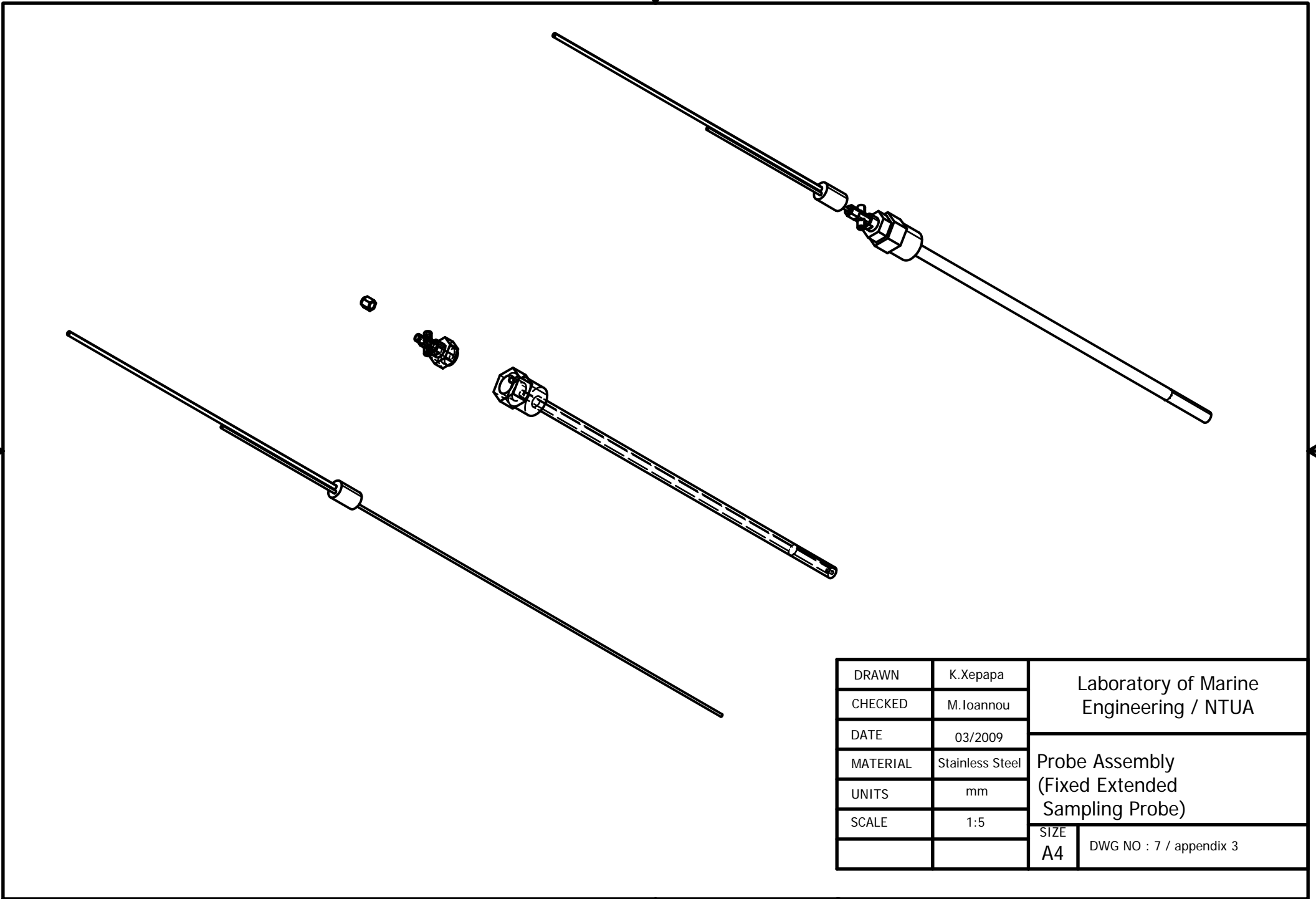
DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	09/2008		
MATERIAL	Stainless Steel	Probe Assembly (Removable Extension sampling Probe)	
UNITS	mm		
SCALE	1:5		
		SIZE A4	DWG NO : 5 / appendix 3



DETAIL A
SCALE 1 : 1



DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	03/2009		
MATERIAL	Stainless Steel	Omega Probe Housing	
UNITS	mm		
SCALE	1:4		
		SIZE A4	DWG NO : 6 / appendix 3



DRAWN	K.Xepapa	Laboratory of Marine Engineering / NTUA	
CHECKED	M.Ioannou		
DATE	03/2009		
MATERIAL	Stainless Steel	Probe Assembly (Fixed Extended Sampling Probe)	
UNITS	mm		
SCALE	1:5		
		SIZE A4	DWG NO : 7 / appendix 3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

**Τεχνικές προδιαγραφές εξωτερικών αγωγών στήριξης και
προστασίας του δειγματολήπτη**

PARKER TEXAS THERMOWELL

SPECIFICATIONS

Materials

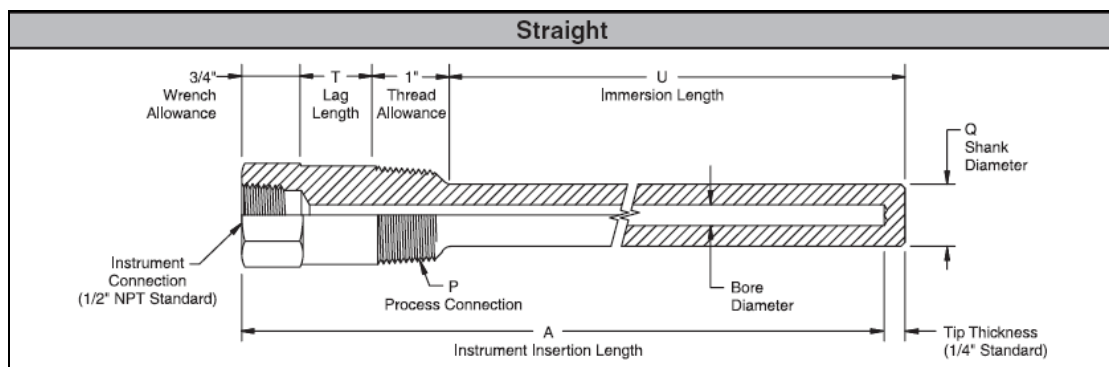
Parker thermowells are available in virtually any material to fit your application. Contact the factory regarding availability of materials not listed in the “Ordering Information” guide on page 5.

Strength

The strength of a thermowell depends on several parameters that relate thermowell construction to the installation environment. For most industrial applications, standard Parker thermowells provide the necessary strength if the material, style, and length are correctly specified for the application parameters: fluid type, temperature, pressure, and fluid velocity. It is important to note that most thermowell failures are caused by vibration that is induced by fluid flow. In addition to providing this selection guide, Parker offers assistance in correctly selecting thermowells, given the application parameters. This service is available for a nominal charge. Contact the factory for more information.

Construction

All 2100 Series thermowell bodies are machined from solid bar stock. Flange mounts are welded to the thermowell body. The material type and traceability code are etched on each thermowell. Additional tagging for specific customer requirements is available.



MANUFACTURING STANDARDS

Mill Standard : +0.000" / -1/32"

Shank O.D. : ±0.010"

"U" Dimension : ±0.050"

Overall Length : ±0.050"

Tip Thickness : 1/4" ±0.050" (unless otherwise specified)

Shank Surface Finish : Polished to 16 RMS

Bore : ± 0.003 "

THERMOWELL TERMINOLOGY

Process Connection	External means to connect thermowell to process system. Wells can be threaded, bolted (to matching flange), clamped, or welded in place.
Instrument Connection	Internal threads to connect temperature instrument to thermowell.
"U" Dimension	Length of thermowell immersed into process system. Measured from the base of the process connection to the end tip of the well.
"T" Dimension	Also called "lag length" or "lagging extension". Extends length between the instrument and process connections to accommodate vessel or piping insulation.
"A" Dimension	Instrument insertion length into thermowell. Equal to bore length.
"D" Dimension	Also called "tip diameter". Diameter of thermowell shank at the end tip of the thermowell. This dimension may vary with process connection and/or shank design.
"Q" Dimension	Also called "root diameter". Diameter of thermowell shank below the process connection. This dimension may vary with process connection and/or shank design.
Bore Diameter	Dimension of internal bore to match the diameter of the instrument inserted into the thermowell.
Straight Shank	Shank O.D. is the same from the root diameter ("Q" dimension) to the tip diameter ("D" dimension). The straight shank is generally used with a 0.385" or larger bore diameter, but is also available with a 0.260" bore.

OMEGA Series 260S Standard Threaded Well for 1/4"

Diameter Elements

Application:

Standard length, 1/4" stem, bimetal thermometers; #20-gage thermocouple elements; unarmored liquid-in-glass test thermometers. Other temperature sensing elements having 0.252" maximum diameter.

Connection Size:

1/2", 3/4" and 1" NPT are standard. Other thread sizes are available upon request.

Protective Coatings for Thermowells:

- Resist Corrosion
- For Chemical Baths
- Color-Coded Sensors for Process Control
- Available in PFA, Epoxy and other materials

Consult Sales Department for complete information

Materials:

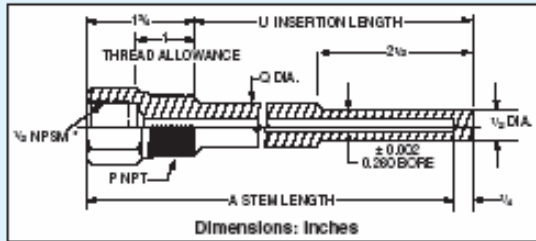
Brass (ASTM B-16); Carbon Steel (C-1018); Stainless Steel A.I.S.I. 304 & A.I.S.I. 316; Monel. Wells are also available in special materials; prices on request.

Cap and Chain Options:

For Brass cap, add **\$4** to price and add suffix "**CC (Brass)**" to the end of the model number when you order.

For 304 SS cap, add **\$7** to the price and add suffix "**CC (304SS)**" to the end of the model number.

Series 260S—General Use



Metric Models Available! See Pages B-33 and B-34

* NPSM internal pipe thread will accept both NPT and NPS male threads.

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!



Shown close to actual size.

To Order (Specify Model Number)

Ext Thread P	Model Number	Materials and Prices				Stem Length A	Insert Length U	Shank Dia. Q
		Stainless Steel 304	Stainless Steel 316	Carbon Steel	Brass			
1/2 NPT	1/2-260S-U21/2-*	\$26.50	\$36.00	\$20.00	\$20.00	4	2 1/2	—
	1/2-260S-U41/2-*	34.50	47.00	30.00	30.00	6	4 1/2	3/4
	1/2-260S-U71/2-*	51.50	69.00	44.00	44.00	9	7 1/2	3/4
	1/2-260S-U101/2-*	62.50	84.50	57.50	57.50	12	10 1/2	3/4
	1/2-260S-U131/2-*	90.00	121.00	74.50	74.50	15	13 1/2	3/4
	1/2-260S-U161/2-*	107.50	144.50	89.00	89.00	18	16 1/2	3/4
1/2-260S-U221/2-*	170.00	200.00	118.50	118.50	24	22 1/2	3/4	
3/4 NPT	3/4-260S-U21/2-*	\$26.50	\$36.00	\$20.00	\$20.00	4	2 1/2	—
	3/4-260S-U41/2-*	34.50	47.00	30.00	30.00	6	4 1/2	3/4
	3/4-260S-U71/2-*	51.50	69.00	44.00	44.00	9	7 1/2	3/4
	3/4-260S-U101/2-*	62.50	84.50	57.50	57.50	12	10 1/2	3/4
	3/4-260S-U131/2-*	90.00	121.00	74.50	74.50	15	13 1/2	3/4
	3/4-260S-U161/2-*	107.50	144.50	89.00	89.00	18	16 1/2	3/4
3/4-260S-U221/2-*	170.00	200.00	118.50	118.50	24	22 1/2	3/4	
1 NPT	1-260S-U21/2-*	\$38.00	\$46.00	\$31.00	\$31.00	4	2 1/2	—
	1-260S-U41/2-*	47.50	64.00	37.00	37.00	6	4 1/2	3/4
	1-260S-U71/2-*	52.50	84.50	48.50	48.50	9	7 1/2	3/4
	1-260S-U101/2-*	78.00	104.00	64.50	64.50	12	10 1/2	3/4
	1-260S-U131/2-*	107.90	144.95	85.50	85.50	15	13 1/2	3/4
	1-260S-U161/2-*	126.00	170.00	100.00	100.00	18	16 1/2	3/4
1-260S-U221/2-*	185.50	213.00	133.00	133.00	24	22 1/2	3/4	

* Specify material type "304SS" for 304 Stainless Steel, "316SS" for 316 Stainless Steel, "CS" for Carbon Steel or "BRASS" for brass. PFA coating available, see page B-14.

Ordering Example: 3/4-260S-U71/2-304SS, 304 stainless steel thermowell with 3/4" NPT external thread, 0.260" internal diameter, 7 1/2" insertion length and a 9" stem length, \$51.50.

For Assistance In Choosing Head and Well Assemblies, See Guide on Page B-5.

These wells are compatible with OMEGA® NB1, NB2, (page B-7); PR-12, PR14, and NPT-style probes, (page C-65); as well as DialTemp™ Thermometers (page E-14).

Pressure-Temperature rating—lb per square inch

Material	Temperature — °F						
	70°	200°	400°	600°	800°	1000°	1200°
Brass	5000	4200	1000	—	—	—	—
Carbon Steel	5200	5000	4800	4600	3500	1500	—
A.I.S.I.-304	7000	6200	5600	5400	5200	4500	1650
A.I.S.I.-316	7000	7000	6400	6200	6100	5100	2500
Monel	6500	6000	5400	5300	5200	1500	—

Increase Response Rate!
Use OT-201 Conductive Silicon Paste;
see page B-36.

Discount Schedule

1-10.....Net	25-100.....20%
11-24.....10%	101 and up....Consult Sales

Discounts apply to similar thermowells.

See Page B-15 For Maximum Fluid Velocity.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5

MAN L16/24 Prototype Research Engine

General engine specifications		
Cycle	4X	
Configuration	In-line	
Power	500	kW
Speed	1000/1200	rpm
Bore	160	mm
Stroke	240	mm
Stroke/bore ratio	1.5:1	
Piston area/cyl.	201	cm ²
Swept volume/cyl.	4.8	lt
Compression ratio	15.5:1	
Max. combustion pressure	180	bar
Turbocharging principle	constant pressure system and intercooling	
Fuel quality acceptance	HFO up to 700 cSt/50°C	

Power lay-out			
Speed	rpm	1000	1200
Mean piston speed	m/sec	8	9.6
Mean effective pressure	bar	22.4	20.7
Max. combustion pressure	bar	180	180
Power/cyl.	kW/cyl.	90	100
	BHP/cyl.	122	136