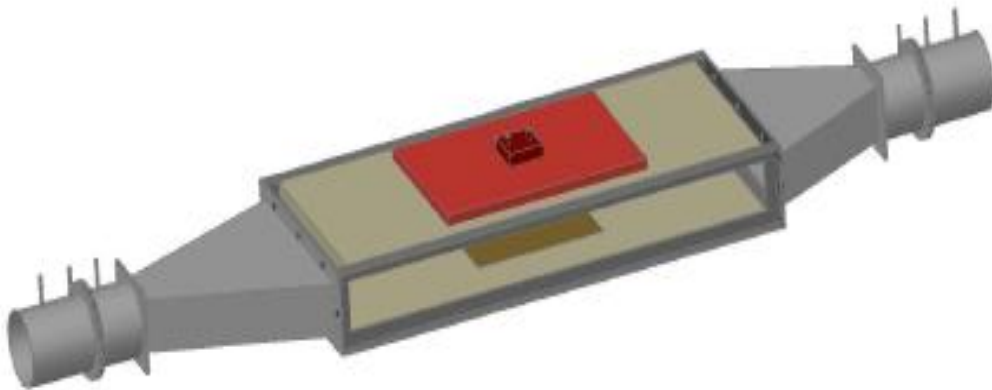


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (Α.Μ. 5796)

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΡΩΜΑΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕ του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και παρουσιάζει τη λεπτομερή κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για τη προσομοίωση των κρυφών περιοχών των αεροσκαφών, η οποία θα συμβάλλει στην μελέτη της έναρξης εστίας φωτιάς στις εν λόγω περιοχές. Στις συγκεκριμένες περιοχές ξεσπούν εστίες φωτιάς, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν ακόμη και στην απώλεια ελέγχου των αεροσκαφών με τραγικό αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινων ζώων. Η αδυναμία εγκατάστασης συστημάτων πυρόσβεσης στις κρυφές/μη προσβάσιμες περιοχές, λόγω της μικρής χωρητικότητας των περιοχών αυτών, οδηγεί στην ανάπτυξη υλικών (όπως καλώδια, μονωτικά, διαχωριστικά, κ.α.) με σκοπό τον περιορισμό της ανάπτυξης ή την εξάλειψη μιας πιθανής εστίας φωτιάς σε αυτές.

Στην αρχή της εργασίας πραγματοποιείται ανασκόπηση, σε ατυχήματα που έχουν συμβεί στο παρελθόν εξαιτίας των πυρκαγιών στις κρυφές περιοχές, καθώς και σε πειραματικές συσκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των ιδιοτήτων των υλικών σε φωτιά. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η φιλοσοφία της κατασκευής της πειραματικής διάταξης και στο τέλος παρουσιάζεται ένα πλούσιο φωτογραφικό υλικό με τη διαμορφωμένη διάταξη καθώς επίσης φωτογραφίες από τη καύση υλικών.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά των Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Ρωμαίο, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Χριστόπουλος Αλέξανδρος
Σεπτέμβριος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία στοχεύει στη κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης για την προσομοίωση των κρυφών περιοχών των αεροσκαφών με απώτερο σκοπό την διερεύνηση της συμπεριφοράς σύνθετων υλικών σε φωτιά η οποία είναι δυνατό να δημιουργηθεί και να εξελιχθεί στις κρυφές περιοχές ή μη-προσβάσιμες περιοχές των αεροσκαφών. Κρυφές ή μη-προσβάσιμες περιοχές ονομάζονται αυτές στις οποίες δεν υπάρχουν εγκατεστημένα μόνιμα συστήματα πυρόσβεσης και το προσωπικό του αεροσκάφους δεν έχει τη δυνατότητα άμεσης πρόσβασης. Ένας σημαντικός αριθμός θανατηφόρων αεροπορικών ατυχημάτων έχουν αποδοθεί στην έλλειψη δυνατότητας άμεσου εντοπισμού και ελέγχου μιας φωτιάς που έχει αναπτυχθεί σε αυτές τις περιοχές.

Η φιλοσοφία της λειτουργίας της εν λόγω πειραματικής διάταξης βασίζεται, στη εξαναγκασμένη ροή αέρα η οποία θα διέρχεται από το στενό πέρασμα ή θάλαμο καύσης της συσκευής όπου είναι τοποθετημένο το υπο δοκιμή υλικό. Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο επίπεδος θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας για την προθέρμανση του υλικού. Με το πέρασμα ενός χρονικού διαστήματος διακόπτεται η λειτουργία του και ενεργοποιείται το φλόγιστρο για την εμφάνιση εστίας φωτιάς επάνω στο υλικό. Με το πέρας ενός χρονικού περιθωρίου διακόπτεται η λειτουργία του και παρατηρείται, εάν αναπτύχθηκε ή όχι επάνω στο υλικό φωτιά. Σε περίπτωση δημιουργίας και εξέλιξης φωτιάς επάνω στο υλικό, τότε μέσω θερμοκρασιακών μετρητών τοποθετημένων στο κάτω μέρος του υλικού, μελετάται εάν η φωτιά διαπέρασε το υλικό (burnthrough phenomenon) καθώς και την εξέλιξη των θερμοκρασιακών τιμών.

Η κατασκευή της διάταξης παρέχει στον χειριστή της τον πλήρη έλεγχο των συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος. Αυτός περιλαμβάνει τον έλεγχο συνθηκών εισόδου και εξόδου της ροής, την ένταση της θερμική ακτινοβολία του θερμαντικού πάνελ στο υπο δοκιμή υλικό καθώς και το χρόνο προθέρμανσής του ,την ισχύ του φλόγιστρου και τον χρόνο εφαρμογής της φλόγας στο υλικό, την διεξαγωγή πειράματος σε διάφορους προσανατολισμού (faceup, facedown, κάθετα) κτλ. Έπειτα τα καπναέρια της καύσης οδηγούνται σε σύστημα απόρριψης για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυσή τους. Όλες οι μεταβλητές του πειράματος εποπτεύονται μέσω αυτοματοποιημένων διατάξεων ελέγχου (FieldPoint), ενώ όλα τα επιθυμητά αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή εξοπλισμένο με κατάλληλο λειτουργικό πρόγραμμα (software).

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε Κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση ατυχημάτων που προκλήθηκαν από φωτιές σε κρυφές περιοχές και με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων που προέρχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες παρουσιάζονται οι κατανομές για την πιθανότητα εμφάνισης φωτιάς καθώς και το χρόνο μέχρι η φωτιά να γίνει ανεξέλεγκτη. Στο τέλος του Κεφαλαίου εμφανίζονται ήδη υπάρχουσες διατάξεις για τη δοκιμή υλικών υπο διάφορες συνθήκες (μεγαλύτερες ή μικρότερες της 1 [atm]) και κλίμακες (πλήρης ή ενδιάμεσες ή εργαστηριακές).

Στο δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση των σύνθετων υλικών στην εξέλιξη των αεροσκαφών με τη πάροδο των χρόνων καθώς και οι τρόποι διαχείρισης της πυρκαγιάς στις απρόσιτες περιοχές των αεροσκαφών.

Στο τρίτο Κεφάλαιο αναφέρεται βήμα προς βήμα ο σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής. Αναφέρεται επίσης ο τρόπος που καθιστά ικανό στο χειριστή της συσκευής να

ελέγχει, α) τις συνθήκες εισόδου καθώς και τις συνθήκες εξόδου, β) την τροφοδοσία του θαλάμου καύσης των υλικών με ομοιόμορφη ροή αέρα, γ) τη λειτουργία του θερμαντικού πάνελ, δ) την εξαγωγή των καπναερίων για τη ποιοτική και ποσοτική ανάλυσή τους. Επίσης παρουσιάζονται χαρακτηριστικοί δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται τον χαρακτηρισμό της ευφλεκτότητας των σύνθετων υλικών όπως, ο Heat Release Rate, Thermal Stability Index, Limiting Oxygen Index, Time to ignition, Mass Loss, Extinction Flammability Index, Surface Flame Spread.

Το τέταρτο Κεφάλαιο, ασχολείται με τη παρουσίαση, όλων των υπολογισμών που συνέβαλαν στο προσδιορισμό των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων της πειραματικής διάταξης για τη διαμόρφωσή της σε μια κρυφή περιοχή καθώς και όλων των μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση σημαντικών παραμέτρων όπως, η μαζική παροχή του ρευστού, η πίεση του, η θερμοκρασία του, κτλ.

Στο πέμπτο και τελευταίο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται η τελική μορφή της πειραματικής διάταξης με πλούσιο φωτογραφικό υλικό από την κατασκευή της συσκευής, καθώς και μερικές φωτογραφίες από τη δοκιμή της διάταξης σε μερικά υλικά για τον έλεγχο της λειτουργίας της.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η κύρια πρωτοτυπία της Εργασίας αυτής είναι η πραγματοποίηση της κατασκευής μιας πρωτότυπης εργαστηριακής συσκευής για την προσομοίωση των κρυφών περιοχών των αεροσκαφών, με σκοπό τη δοκιμή νέων υλικών για τη θερμική θωράκιση των αναφερόμενων περιοχών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΦΩΤΙΕΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ (HIDDENZONES).....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	3
1.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	11
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2.1.1 Σύνθετα υλικά	12
2.1.1.1 Σύνθετα υλικά νημάτων/ρητίνης.....	13
2.1.1.2 Είδη υφασμάτων.....	17
2.1.1.3 Σύνθετα στρωματοειδή (σάντουιτς)	20
2.1.2 Επισκευές σύνθετων υλικών.....	22
2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ	23
2.2.1 Ασφάλεια πληρώματος.....	23
2.2.2 Διαχείριση πυρκαγιάς εν πτήση	28
2.2.3 Τύποι πυροσβεστήρων	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	31
ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	31
3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ	34
3.3.1 Υπολογισμός συντελεστή ροής, C.....	37
3.3.1.1 Υπολογισμός διαμέτρων D_1 και D_2	37
3.3.1.2 Υπολογισμός αριθμού Reynolds.....	39
3.3.1.3 Προσδιορισμό αποστάσεων L_1 και L_2	42
3.3.1.4 Αβεβαιότητες στο orifice plate.....	44
3.3.1.5 Συνάρτηση υπολογισμού συντελεστή ροής, C.....	45

3.3.2	Συντελεστής διαστολής, ϵ	45
3.3.3	Μετρητής διαφορικής πίεσης, ΔP	48
3.3.4	Μέτρηση θερμοκρασίας	50
3.3.4.1	Στατικά χαρακτηριστικά αισθητήρων	52
3.3.4.2	Δυναμικά χαρακτηριστικά	56
3.3.5	Συστήματα καταγραφής δεδομένων	60
3.3.5.1	Συσκευές DAQ εργαστηριακών εφαρμογών	60
3.3.5.2	Λειτουργικά χαρακτηριστικά καρτών	62
3.3.5.3	Signal conditioning	63
3.4	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ	66
3.5	ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΠΝΑΕΡΙΩΝ	68
3.5.1	Φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό <i>fourier transform infrared spectroscopy, ft-ir</i>	68
3.5.1.1	Αρχή λειτουργίας φασματοφωτόμετρου, <i>ft-ir</i>	69
3.5.1.2	Δυνατότητες και πλεονεκτήματα φασματοφωτόμετρου, <i>ft-ir</i>	71
3.5.2	Καλορίμετρο κώνου (Cone calorimeter)	73
3.5.2.1	Εισαγωγή	73
3.5.2.2	Διεξάγοντας πείραμα	75
3.5.2.3	Ερμηνεύοντας τα πειραματικά αποτελέσματα	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	91
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	91
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	91
4.2	ΚΑΝΑΛΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ	93
4.2.1	Μέτρηση παροχής	94
4.2.1.1	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μετρητή διαφράγματος	94
4.2.1.2	Μετρητής διαφορικής πίεσης	104
4.2.1.3	Μετρητής θερμοκρασίας	106
4.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ ΡΟΗΣ (ΔΙΑΧΥΤΗΣ)	110
4.4	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ	116
4.4.1	Μονωτικές πλάκες	118
4.4.2	Θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας	120
4.4.3	Φλόγιστρο	122
4.5	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ ΡΟΗΣ (ΣΥΓΧΥΤΗΣ)	122
4.6	ΚΑΝΑΛΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ	123
4.7	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (FIELDPOINT)	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	133

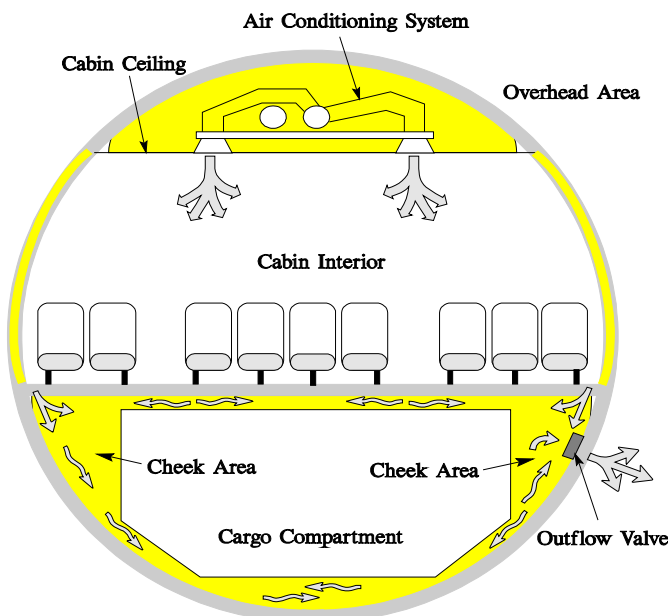
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	133
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	133
5.2 ΔΟΚΙΜΗ ΥΛΙΚΩΝ	135
5.2.1 Ξύλινο πάνελ	135
5.2.2 Μονωτικό πάνελ	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΦΩΤΙΕΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ (HIDDENZONES)

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη και η εξέλιξη μιας φωτιάς στα αεροσκάφη αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πεδίο έρευνας για τις κατασκευάστριες αεροπορικές εταιρείες, καθώς έχει να κάνει άμεσα με την ασφάλεια των επιβατών και του πλήρωματος. Ειδικότερα, υψηλότερο βαθμό επικινδυνότητας έχουν οι φωτιές που η εστία τους είναι σε περιοχές του αεροσκάφους όπου το πλήρωμα δεν έχει πρόσβαση και δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν συστήματα ανίχνευσης και πυρόσβεσης λόγω του περιορισμένου χώρου. Στη βιβλιογραφία, οι περιοχές αυτές ονομάζονται ως απρόσιτες ή κρυφές περιοχές και βρίσκονται εντός του υπο-πίεση κελύφους του αεροσκάφους και πιο συγκεκριμένα στις εγκαταστάσεις των ηλεκτρολογικών και υδραυλικών συστημάτων. Τέτοιες περιοχές είναι επάνω από τη καμπίνα των επιβατών, οι περιοχές των αποσκευών καθώς και οι περιοχές πίσω από τα πλευρικά τοιχώματα (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Σχήμα με τις απρόσιτες περιοχές, μαρκαρισμένες με κίτρινο χρώμα (<http://www.faa.gov>).

Η φωτιά εν πτήση είναι μια πολύ σημαντική πηγή κινδύνου της απώλειας ελέγχου στα πολιτικά ή εμπορικά αεροσκάφη, και ταξινομείται στη τέταρτη υψηλότερη γνωστή αιτία μοιραίων ατυχημάτων. Γι' αυτό το λόγο όλες οι κατασκευαστικές εταιρείες αεροσκαφών με γνώμονα πάντοτε την ασφάλεια του πληρώματος, διεξάγουν έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη σε συνθήκες φωτιάς. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών στις μη προσβάσιμες περιοχές του αεροσκάφους, στις οποίες το ζητούμενο είναι η αποφυγή έναρξης μιας φωτιάς και ο περιορισμός της εξάπλωσης της (Boeing, 2005).

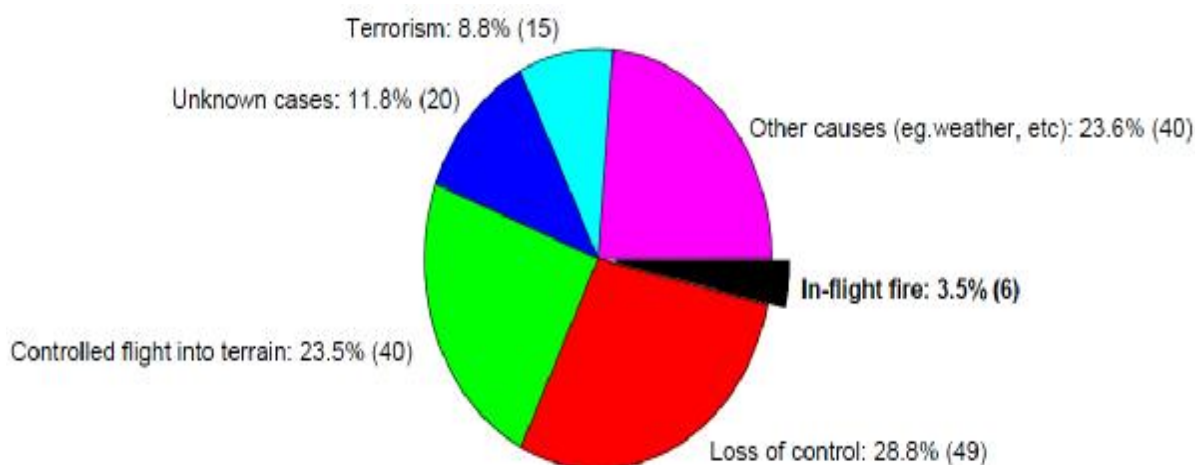
Με την αυξανόμενη χρήση των σύνθετων υλικών στις αεροπορικές κατασκευές, ο τομέας της ασφάλειας σε συνθήκες φωτιάς είναι συνεχώς αυξανόμενος και απαιτητικός. Στην μέχρι βιβλιογραφία οι διάφοροι έλεγχοι για την πιστοποίηση των αεροπορικών υλικών αλλά και των αεροσκαφών στο σύνολό τους αποτελούνται από εκτενείς πειραματικές δοκιμές σε μεσαία κλίμακα καθώς και σε πλήρους κλίμακας κατασκευές. Οι προδιαγραφές των ελέγχων ορίζονται από την Ομοσπονδία Διεύθυνσης Αεροπλοΐας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, Federal Aviation Administration FAA. Όπως γίνεται αντιληπτό πλήρους κλίμακας δοκιμές είναι χρονοβόρες αλλά και οικονομικά ασύμφορες, για τον λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια πραγματοποιούνται προσπάθειες από την FAA για την καθιέρωση Προτύπων ελέγχου μικρής κλίμακας τα οποία σε συνδυασμό με αριθμητικά μοντέλα θα είναι σε θέση να προβλέπουν την συμπεριφορά των αεροπορικών κατασκευών σε συνθήκες φωτιάς από την φάση σχεδιασμού τους. Θα εξασφαλίζεται έτσι καλύτερη διαχείριση οικονομικών και υλικών πόρων. Η αριθμητική προσομοίωση προϋποθέτει γνώση της συμπεριφοράς των πολυμερών υλικών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται πειράματα απώλειας μάζας με χρήση καλορίμετρου κώνου κατά τη διάρκεια της οποίας η απώλεια μάζας καθώς και ο ρυθμός αυτής παρακολουθούνται και καταγράφονται σαν συνάρτηση του ρυθμού θέρμανσης. Μέσα από αυτά τα δεδομένα μπορεί να πραγματοποιηθεί εκτίμηση του τρόπου αποσύνθεσης του πολυμερούς.

Ο στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης που θα προσομοιάζει αυτές τις περιοχές με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών σε περίπτωση φωτιάς. Σε αυτή τη συσκευή θα πραγματοποιείται μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών σε συνθήκες φωτιάς, και τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης θα συμβάλλουν στη κατανόηση της συμπεριφοράς της φωτιάς καθώς και στη ταυτοποίηση των εμπλεκόμενων μηχανισμών και τις συνέπειες τους. Η συμπεριφορά των σύνθετων πολυμερών υλικών σε συνθήκες φωτιάς περιγράφεται από κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται για την ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των διάφορων υποψήφιων αεροπορικών υλικών. Τέτοια μεγέθη είναι, ρυθμός έκλυσης θερμότητας, χρόνος έναυσης φωτιάς, ρυθμός εξάπλωσης φωτιάς, τοξικότητα αερίων από την καύση, παραγωγή καπνού.

1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

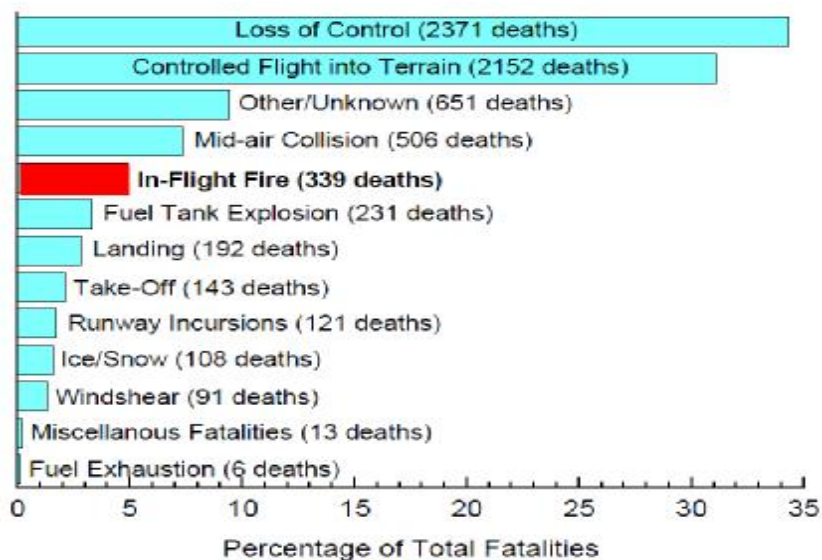
Η πυρασφάλεια των αεροσκαφών είναι η ύψιστη προτεραιότητα των εναέριων αρχών ασφαλείας, αφού από αυτήν διακυβεύονται πολλές ανθρώπινες ζωές. Οι πυρκαγιές, εν πτήση, είναι εξαιρετικά επικίνδυνες επειδή υπάρχει πολύ λίγος χρόνος για τη καταπολέμησή τους και την εξάλειψή τους προτού οι ζωές του πληρώματος και των επιβατών μπουν σε κίνδυνο. Γι' αυτό το λόγο η χρησιμοποίηση πυράντοχων σύνθετων υλικών στις κρυφές περιοχές θεωρείται ζωτικής σημασίας. Άξιο αναφοράς, για την σοβαρότητα του φαινομένου εξέτασης είναι ένα παράδειγμα όπου μια φωτιά ξεσπά στη περιοχή φύλαξης των αποσκευών, και το πλήρωμα έχει γύρω στα δυο λεπτά για τη κατάσβεσή της. Εάν γίνει υπέρβαση του παραπάνω χρονικού περιθωρίου, η φωτιά τότε θα εξαπλωθεί τόσο πολύ που τα συστήματα καταστολής του αεροσκάφους θα είναι ανίκανα να τη κατασβήσουν. Εάν όμως στο αεροσκάφος υπάρχει φωτιά που μπορεί να κατασβηστεί, τότε οι πιλότοι έχουν το πολύ 14 λεπτά να προσγειωθούν και να εκκενώσουν το αεροσκάφος πριν ο καπνός τους εμποδίσει.

Το διάγραμμα του Σχήματος 1.2, μας παρουσιάζει τις αιτίες των θανατηφόρων αεροπορικών ατυχημάτων μέσα σε μια χρονική περίοδο εννέα χρόνων (από το 1987 έως το 1996). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου υπήρξαν 180 ατυχήματα, αλλά μόνο τα έξι από αυτά (ή το 3,5%) προκλήθηκαν από φωτιά. Σε αυτή τη περίοδο, οι φωτιές εν πτήση ήταν η δεύτερη πιο κοινή αιτία ατυχημάτων σε αεροσκάφη (συμπεριλαμβανομένων και των ατυχημάτων που οφείλονται σε άγνωστες αιτίες). Η μείωση της συχνότητας της εμφάνισης των συγκεκριμένων ατυχημάτων έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν αυστηροί κανονισμοί πυρασφάλειας καθώς και αποτελεσματικά συστήματα κατάσβεσης (Cherry R. et al, 1999).



Σχήμα 1.2: Αιτίες θανάτων σε αεροσκάφος μεταξύ 1987 και 1996 (<http://www.faa.gov>).

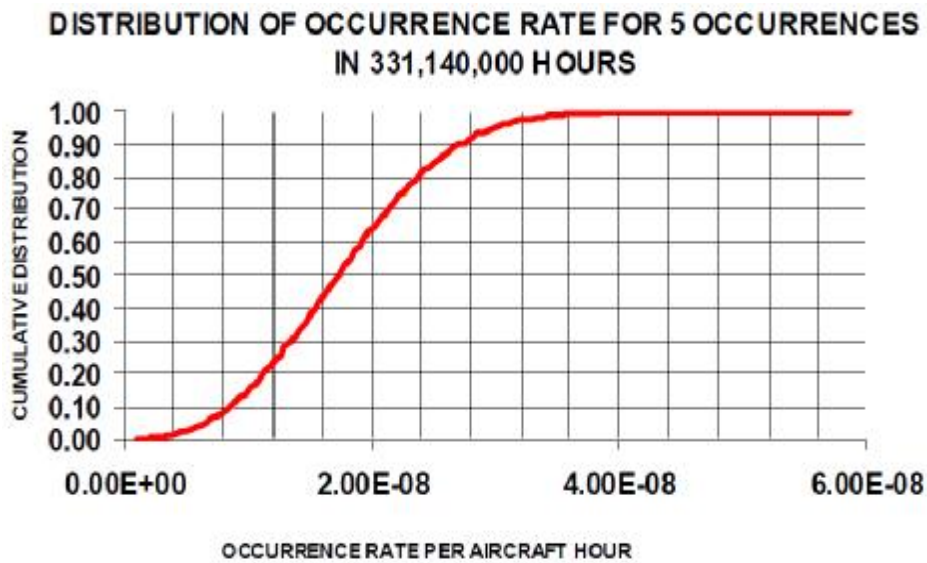
Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται χρονικά ταξινομημένες οι αιτίες θανατηφόρων αεροπορικών ατυχημάτων, στο χρονικό διάστημα από το 1992 μέχρι το 2001, όπου 339 επιβάτες (το 4,9% επί των συνολικών θανάτων) βρήκαν το θάνατο εξαιτίας φωτιάς εν πτήσει. Αυτά τα στατιστικά στοιχεία, τονίζουν το κίνδυνο που συνοδεύουν τις εν πτήσει φωτιές και τις συνδέουν με ένα τραγικά μεγάλο ποσοστό θανάτων (<http://www.faa.gov>).



Σχήμα 1.3: Ταξινομημένες αιτίες θανατηφόρων ατυχημάτων στο χρονικό διάστημα από 1992 έως 2001 (<http://www.faa.gov>).

Με τη πάροδο του χρόνου οι κατασκευαστικές εταιρίες αεροσκαφών μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης κατάφεραν να συμβάλλουν σε μια σημαντική μείωση του αριθμού των ατυχημάτων. Αυτή η εμπειρία που κερδήθηκε με το πέρασμα των ετών, επιτρέπει στις κατασκευαστικές εταιρίες την εξέλιξη νέων συστημάτων πρόληψης φωτιάς. Η Federal Aviation Administration, European Safety Aviation Administration καθώς και οι κατασκευαστικές εταιρείες, μέσω της συνεχής έρευνας και των πειραματικών αποτελεσμάτων ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο πρόληψης ρίσκου προκειμένου να αποτιμηθεί η χρησιμοποίηση ενισχυμένης προστασίας στις κρυφές περιοχές του αεροσκάφους (R.G.W. Cherry et al, 2002), (Cherry R. et al, 1999).

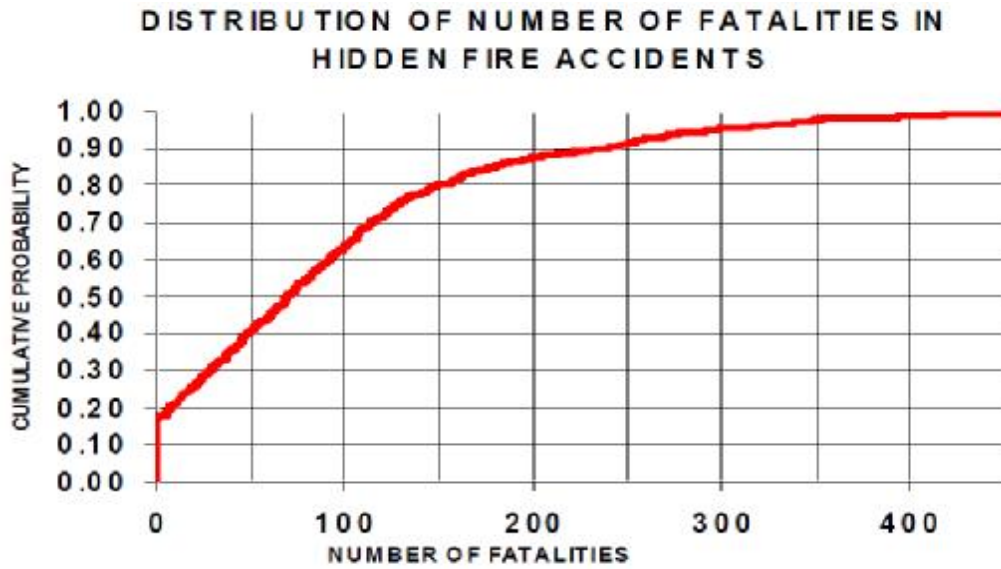
Το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιεί τις κατανομές που προέρχονται από ληφθέντα εν πτήσει δεδομένα, καθώς και από παρελθοντικά ατυχήματα. Κατά τη χρονική περίοδο 1991 έως 2000, η κατασκευαστική εταιρία Western αξιολόγησε δεδομένα που λήφθηκαν από εν πτήσει αεροσκάφους συνολικής διάρκειας 331,140,000 ώρες πτήσης. Όλα αυτά τα δεδομένα συλλέχτηκαν και παρουσιάζονται στη Σχήμα 1.4, ως τη κατανομή του ρυθμού εμφάνισης ανεξέλεγκτων φωτιών στις κρυφές περιοχές του αεροσκάφους. Ο χρόνος ώστε η φωτιά να γίνει ανεξέλεγκτη λαμβάνεται από τη πρώτη ένδειξη που έχει το πλήρωμα για την ύπαρξη φωτιάς σε κρυφή περιοχή μέχρι να γίνει καταστροφικά ανεξέλεγκτη, σύμφωνα με το Σχήμα 1.5(R.G.W. Cherry et al, 2002). Επίσης η κατανομή του αριθμού των θανατηφόρων ατυχημάτων που προκλήθηκαν από φωτιά σε κρυφές περιοχές παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6. Σε αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι το 17% των ατυχημάτων δεν οδηγούν σε θάνατο κάποιου επιβαίνοντα (Cherry R. et al, 1999).



Σχήμα 1.4: Κατανομή του ρυθμού εμφάνισης ανεξέλεγκτων πυρκαγιών σε κρυφές περιοχές (R.G.W. Cherry et al, 2002).



Σχήμα 1.5: Αθροιστική κατανομή πιθανότητας του χρόνου μέχρι η φωτιά να γίνει ανεξέλεγκτη (R.G.W. Cherry et al, 2002).



Σχήμα 1.6: Κατανομή του αριθμού θανάτων που οφείλονται σε πυρκαγιές στις κρύες περιοχές αεροσκαφών (R.G.W. Cherry et al, 2002).

1.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΚΡΥΦΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Αρκετές φωτιές που εξελίσσονται εν πτήσει συνήθως ξεσπούν στις κρυφές περιοχές, όπως πάνω από την οροφή της καμπίνας, πίσω από τους πλευρικούς τοίχους, κάτω από το δάπεδο ή στους αρμούς ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών καλωδίων, σημεία που είναι δύσκολο για το πλήρωμα του αεροσκάφους να εντοπίσουν τη φωτιά και να τη κατασβήσουν.

Η Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (FAA) αποσκοπεί στην ανάπτυξη αυστηρότερων μεθόδων για δοκιμές καύσης υλικών που βρίσκονται στις κρυφές περιοχές. Αυτή η έρευνα στοχεύει, στην ευφλεκτότητα των υλικών, όπως είναι οι αγωγοί, τα καλώδια, τα καλύμματα των ανοιγμάτων καθώς και άλλα μονωτικά υλικά, ώστε να αναβαθμιστούν τα υλικά σε ένα ισοδύναμο επίπεδο αντοχής στη φωτιά (McLean B., 2004). Επομένως ο στόχος της είναι, η παθητική μείωση της πιθανότητας εμφάνισης πυρκαγιάς εν πτήσει μέσω της βελτίωσης της αντοχής σε φωτιά των υλικών που βρίσκονται στις κρυφές περιοχές.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της FAA, σε όλα τα υλικά που βρίσκονται στις επιθυμητές περιοχές μελέτης (απρόσιτες περιοχές) μπορεί να μελετηθεί η αναφλεξιμότητά τους είτε σε πλήρη κλίμακα (Full Scale) ή σε ενδιάμεση κλίμακα (Intermediate Scale). Στη περίπτωση μελέτης υπο πλήρη κλίμακα ή ενδιάμεση κλίμακα τα υλικά, όπως αγωγοί ή μονωτικά υλικά, εκτίθενται σε μια πρότυπη πηγή φωτιάς προκειμένου να εκτιμηθεί και να προσδιοριστεί η συμπεριφορά τους σε φωτιά. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται για τη πιστοποίηση των υλικών σε αεροπορικές εφαρμογές, δεν επαρκούν για την πιστοποίηση τους αφού πρόκειται για μεγάλες διατάξεις δοκιμών οι οποίες όμως είναι αρκετά χρονοβόρες και απαιτούν αρκετούς χρηματικούς πόρους για την διεξαγωγή τους. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα πειράματα Full Scale ή Intermediate Scale χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη νέων διατάξεων εργαστηριακής κλίμακας με σκοπό την πιστοποίηση της αντίστασης της διάδοσης φωτιάς επάνω σε νέα πυράντοχα υλικά που προορίζονται για την κατασκευή του σκελετού του αεροσκάφους.

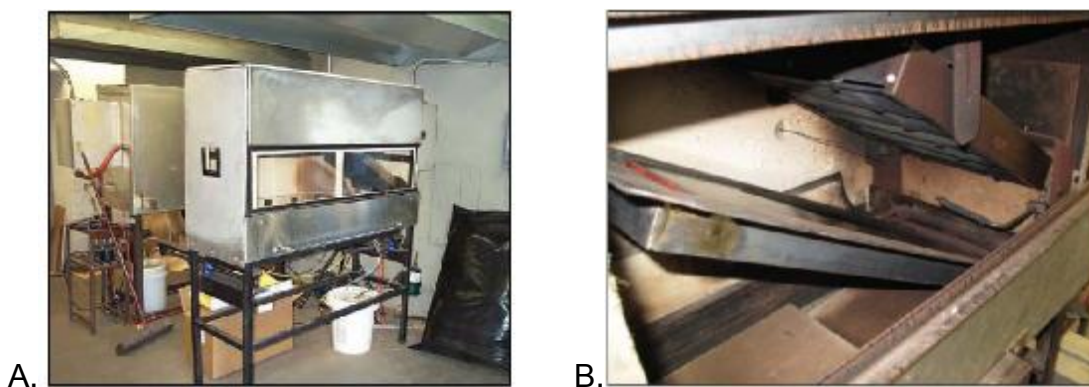


Εικόνα 1.1: Διαμόρφωση πλήρους κλίμακας (R.G.WCherryetal, 2002).



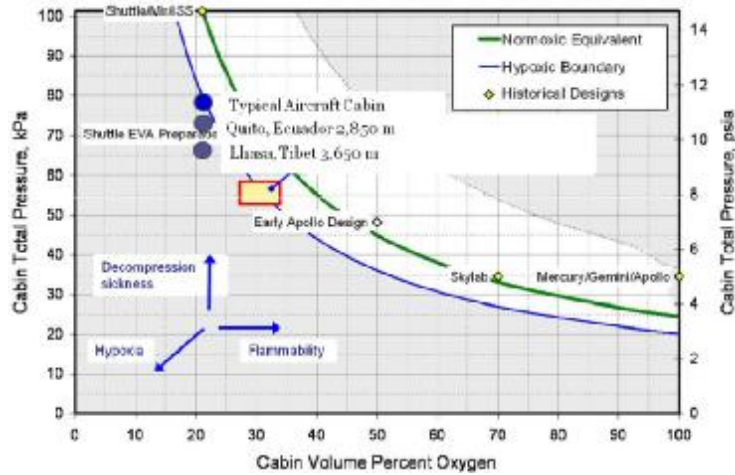
Εικόνα 1.2: Διαμόρφωση προσομοίωσης ενδιάμεσης κλίμακας (R.G.WCherryetal, 2002).

Για το λόγο αυτό προέκυψαν οι διαμορφώσεις εργαστηριακής κλίμακας οι οποίες χαρακτηρίζονται αποδοτικότερες από τις άλλες μεθόδους προσομοίωσης. Η πιο κοινή μέθοδος δοκιμής εργαστηριακής κλίμακας υλικών είναι το πάνελ θερμικής ακτινοβολίας ή αλλιώς ένας επίπεδος θερμοπομπός (Radiant Heat Panel). Ο επίπεδος θερμοπομπός είναι πολύ χρήσιμος για την αξιολόγηση της διάδοσης της φωτιάς επάνω στα υλικά, πρόκειται για μια μέθοδο αξιολόγησης που ονομάζεται ‘επιφανειακή εξέταση’ αφού η ακτινοβολία και το φλόγιστρο ανάφλεξης εφαρμόζονται επιφανειακά στο υλικά. Παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στις πειραματικές διερευνήσεις είναι το πάχος του υλικού και η θερμική του αγωγιμότητα. Επίσης ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης περιλαμβάνει τη ρύθμιση των παραμέτρων του πειράματος που σχετίζονται με το χρόνο προθέρμανσης, το χρόνο έκθεσης του υλικού στη φωτιά, η ενέργεια της ακτινοβολούμενης θερμότητας κτλ. (Ochs R.I, 2010).



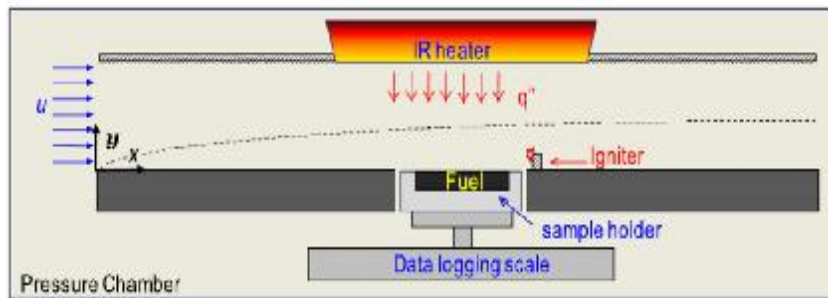
Εικόνα 1.3: Δοκιμή εργαστηριακής κλίμακας με τη μέθοδο Radiant Heat Panel (Ochs R.I, 2010).

Μια άλλη σημαντική πτυχή της πειραματικής διερεύνησης της ευφλεκτότητας των υλικών είναι η συμπεριφορά της φωτιάς υπο μη ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η πυρκαγιά μπορεί να εμφανιστεί είτε σε πιέσεις μικρότερες από αυτές της ατμοσφαιρικής πίεσης (~101kPa, 21% O₂) είτε σε περιβάλλοντα υψηλής πίεσης ή μέσα σε κλειστούς χώρους που βρίσκονται υπο πίεση, όπως οι καμπίνες των αεροσκαφών. Η πίεση στη καμπίνα των αεροσκαφών βρίσκεται συνήθως στα ‘8000 πόδια’ ή περίπου στα 75 [kPa], Σχήμα1.7.

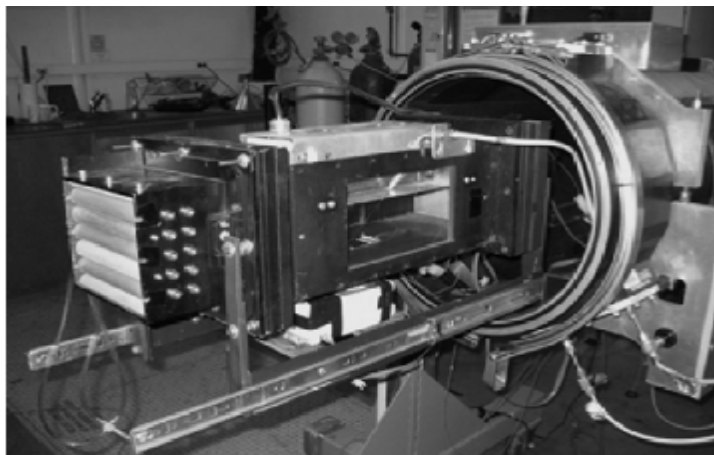


Σχήμα 1.7: Πιεζομετρικά περιβάλλοντα καμπίνας(Fereres S. et al, 2010)

Η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που ευθύνονται για την ανάφλεξη των υλικών υπο συνθήκες χαμηλής πίεσης είναι αρκετά σημαντική για τις κατασκευάστριες εταιρίες. Γι' αυτό το λόγο έχουν δημιουργηθεί ελεγχόμενες δοκιμές ανάφλεξης που περιλαμβάνουν την εξαναγκασμένη ροή αέρα μέσα σε ένα τούνελ και την ακτινοβολία του υπο δοκιμή υλικού με μια θερμική ροή, σε ελεγχόμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες (Fereres et al, 2011). Το Σχήμα 1.8, παρουσιάζει μια απλοποιημένη σχηματική παράσταση της αναφερόμενης πειραματικής συσκευής. Αποτελείται από μια μικρής κλίμακας αεροσήραγγα καύσης, ικανή να υποστηρίξει τα μετρητικά όργανα σε ένα κλειστό υπο πίεση δοχείο, το οποίο επιτρέπει τη διεξαγωγή του πειράματος σε ποικίλες πιέσεις.(Fereres S. et al, 2010)



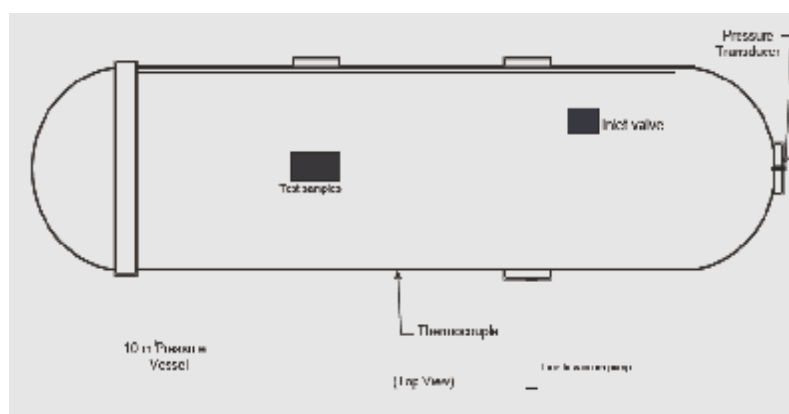
Σχήμα 1.8: Σχηματική παράσταση αεροσήραγγας εξαναγκασμένης ροής αέρα (Fereres et al, 2011).



Εικόνα1.4 : Άποψη πειραματικής συσκευής (Fererres et al, 2011).

Τις χρονιές 2006 και 2010 συνέβησαν δυο ατυχήματα σε αεροσκάφη μεταφοράς φορτίων, γνωστά και ως freighter, στα οποία το προσωπικό του αεροσκάφους ανέφερε την ύπαρξη καπνού στο cargo compartment ο οποίος εξελίχθηκε ραγδαία σε πυρκαγιά με αποτέλεσμα τον ακαριαίο θάνατο των επιβαινόντων και την ολοκληρωτική καταστροφή του αεροσκάφους (Hill R., 2010). Λαμβάνοντας υπόψη τα δυο αναφερόμενα περιστατικά η National Transportation Safety Boar (NTSB) απευθύνθηκε στην FAA για την διαλεύκανση της υπόθεσης. Γι' αυτό το λόγο η FAA χρησιμοποίησε την ιδέα της διάταξης της *Εικόνας 1.4*, προκειμένου να μελετήσει σε ένα κλειστό υπο πίεση χώρο τη φάση της αποσυμπίεσης μέσω δυο σειρών πειραματικών δοκιμών.

Η πρώτη φάση του πειράματος, περιλάμβανε δοκιμές με διάφορες πηγές φωτιάς υπο διάφορες πιέσεις ώστε να μετρηθεί η επίδραση της πίεσης στην ένταση της φωτιάς και στο χρόνο καύσης. Ενώ η δεύτερη σειρά, περιλάμβανε τη διεξαγωγή πειραμάτων για τον προσδιορισμό της επίδρασης της μεταβολής της πίεσης όταν έχει ανιχνευθεί πυρκαγιά στο χώρο αποθήκευσης των αποσκευών. Μια σχηματική προσέγγιση της εν λόγω συσκευής παρουσιάζεται στο *Σχήμα 1.9*.



Σχήμα 1.9: Σχηματική άποψη πειραματικής συσκευής για την επίδραση της αποσυμπίεσης στους χώρους μεταφοράς φορτίων(Hill R., 2010).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχεδίαση και κατασκευή της πτητικής μηχανής προϋποθέτει την λύση σειράς προβλημάτων στους τομείς της αεροδυναμικής, της μηχανικής πτήσης, της δομικής ανάλυσης κλπ. αλλά πάνω από όλα της επιλογής των κατάλληλων υλικών των οποίων η αξιοπιστία και η αναλογία αντοχής προς το βάρος τα καθιστά ικανά να χαρακτηριστούν ως αεροπορικά υλικά και επομένως να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή της πτητικής μηχανής.

Τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις πρωτοπόρες πτητικές μηχανές, ως γνωστό ήταν το ξύλο και το ύφασμα. Τα μεταλλικά υλικά, όπως τα κράματα του αλουμινίου, μαγνησίου, τιτανίου και τελευταία του αλουμινίου-λιθίου, είναι εκείνα των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά συντέλεσαν στη καθιέρωσή τους ως κύρια αεροπορικά δομικά υλικά και βάσει αυτών να κατασκευαστεί το πλήθος των πτητικών μηχανών. Είναι όμως βέβαιο ότι η καθιέρωση αυτών των ελαφρών μεταλλικών κραμάτων, δε μπόρεσε ποτέ να σταματήσει την έρευνα για ανεύρεση υλικών με τεχνικά χαρακτηριστικά ακόμα καλύτερα καθώς και κατασκευαστικών μεθόδων που θα επέτρεπαν την τόσο αναγκαία εξοικονόμηση βάρους στην αεροπορική κατασκευή (Lyon R.E., 1997)

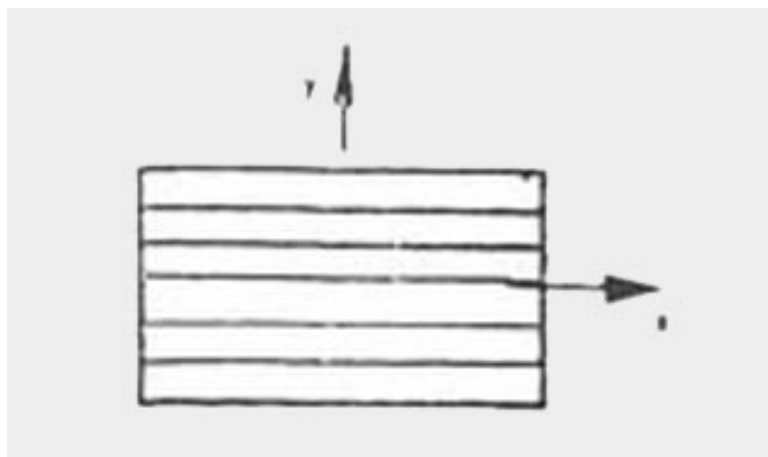
Σε αυτή την έρευνα των υλικών, η χημεία έκανε μεγαλύτερα βήματα από ότι η μεταλλουργία, παρουσιάζοντας ένα πλήθος προϊόντων τα οποία αρχίζουν από τις ειδικές αεροπορικές κόλλες, τις εποξειδικές ρητίνες, τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα, τις πολυουρεθάνες, τις πολυστερίνες, τα θερμοπλαστικά και καταλήγουν στα ειδικά κεραμικά υλικά. Με τον κατάλληλο συνδυασμό ορισμένων εξ' αυτών των υλικών είναι δυνατόν να αποκτηθεί ένα σύνθετο υλικό το οποίο θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά όπως, αντοχή στα στατικά ή δυναμικά φορτία, ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στις καιρικές συνθήκες, θερμική αγωγιμότητα, ακουστική μόνωση, ειδικό βάρος, μέτρο ελαστικότητας κτλ. πολύ καλύτερα από εκείνα των μεμονωμένων υλικών που το συνθέτουν. Στο Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η χρήση διάφορων κατασκευαστικών υλικών που εφαρμόζαν γνωστές κατασκευαστριες εταιρίες στο πέρασμα των ετών.

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικός πίνακας εξέλιξης της χρήσης των υλικών σε τρεις γνωστές αεροπορικές κατασκευάστριες εταιρίες.

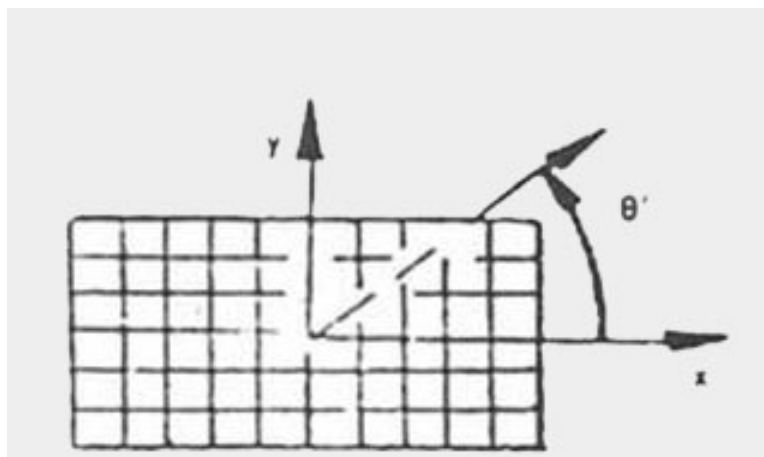
Κατασκευαστική Εταιρία	Airbus Industrie		McDonnell-Douglas		Boeing	
Υλικό / Έτος	1985	2000	1985	2000	1985	2000
Αλουμίνιο	76%	35%	82%	-	80%	11%
Χάλυβας	8%	6%	13%	20%	14%	11%
Τιτάνιο	6%	9%	4%	3%	2%	12%
Σύνθετα	5%	46%	1%	13%	3%	65%
Αλουμίνιο/Λίθιο	-	-	-	34%	-	-

2.1.1 Σύνθετα υλικά

Εξ' ορισμού, σύνθετα υλικά ονομάζονται τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την απόκτηση καλύτερων και χρησιμότερων ιδιοτήτων (Mouritz A.P., 2006). Το σύνθετο υλικό είναι ανομοιογενές και ανισότροπο. Ανομοιογενές είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές από σημείο σε σημείο, ενώ το ανισότροπο συμπεριφέρεται με διαφορετική αντοχή όταν το φορτίο εφαρμόζεται υπο διαφορετικές διευθύνσεις. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν n επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων του υλικού, επομένως τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι συναρτήσεις του προσανατολισμού σε ένα σημείο του υλικού. Για να αποκτηθεί ένα ισότροπο σύνθετο υλικό, επί παραδείγματι από υαλούφασμα, είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν περισσότερες στρώσεις υφάσματος υπο διαφορετικές κύριες διευθύνσεις αντοχής έτσι ώστε το υλικό που θα προκύψει να παρουσιάζει την αυτή συμπεριφορά υπο οποιαδήποτε διεύθυνση του εφαρμοστεί το φορτίο. Αντιθέτως με τα σύνθετα υλικά, τα μεταλλικά υλικά θεωρούνται ομοιογενή και ισότροπα.



Σχήμα 2.1: Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά μια μόνο διεύθυνση (<http://www.redstar.gr>).



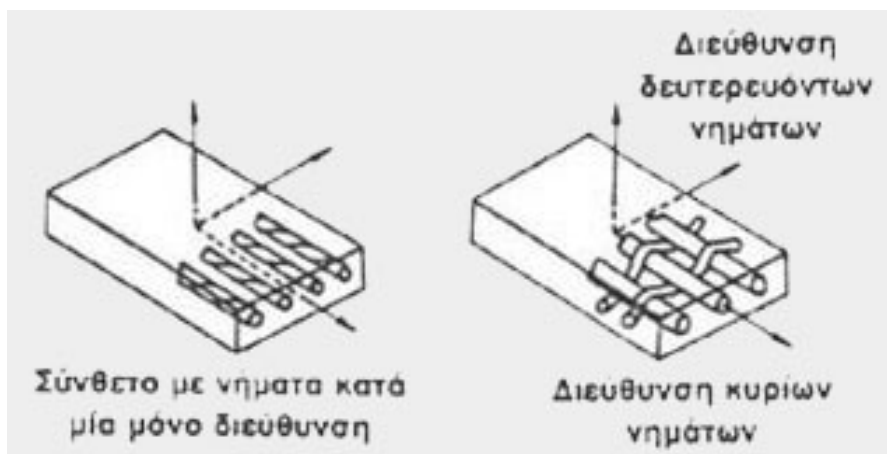
Σχήμα 2.2: Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά δυο διευθύνσεις τον διαμήκη (x) και τον εγκάρσιο (y) (<http://www.redstar.gr>).

Τα μεταλλικά κράματα προκύπτουν από τη σύνθεση διαφορετικών μετάλλων, αλλά αυτό γίνεται σε μικροσκοπική κλίμακα, ενώ μακροσκοπικώς παρουσιάζονται και λαμβάνονται ως ομοιογενή υλικά. Ένα πολύ γνωστό σύνθετο υλικό είναι εκείνο το οποίο αποκτάται εμποτίζοντας υαλούφασμα με πολυεστερική ή εποξειδική ρητίνη. Όταν η ρητίνη στερεοποιηθεί, τότε το σύνθετο υλικό που θα προκύψει θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία θα είναι συναρτήσεις, των δυο επιμέρους υλικών (υαλούφασματος-ρητίνης), του τρόπου εμποτισμού, της αναλογίας σε βάρος υφάσματος/ρητίνης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπο την οποία έγινε η εργασία, της θερμοκρασίας υπο την οποία θα γίνει η σκλήρυνση της ρητίνης, τη διευθέτηση των κύριων νημάτων του υφάσματος σε σχέση με την διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου κτλ.

2.1.1.1 Σύνθετα υλικά νημάτων/ρητίνης

Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά αποκτώνται με υφάσματα ή νήματα εμποτισμένα με ρητίνη. Τα υαλούφασματα, τα ανθρακονήματα, το Kevlar και άλλα γνωστά εμπορικά ονόματα συνιστούν τη μεγαλύτερη οικογένεια των σύνθετων υλικών σε αεροναυπηγικές εφαρμογές.

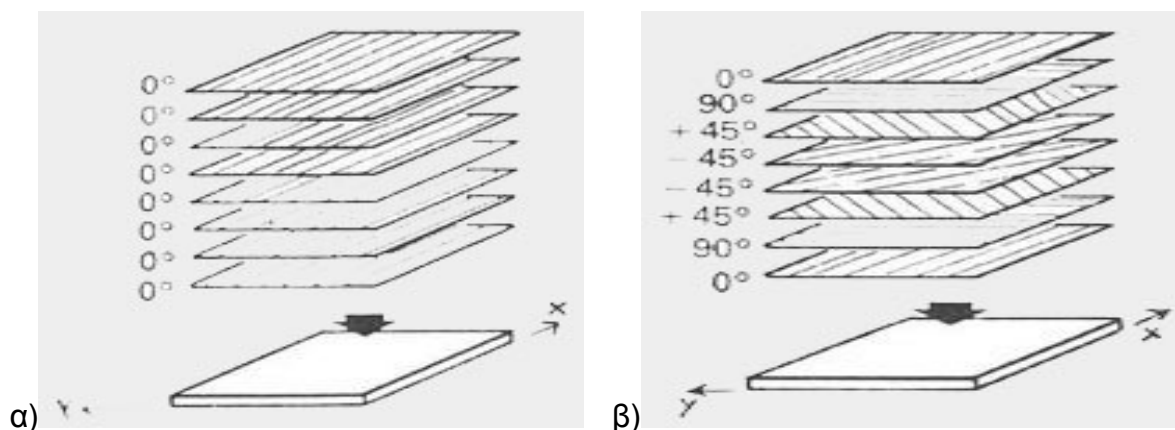
Το βασικότερο πλεονέκτημα των σύνθετων έναντι άλλων υλικών (μεταλλικών, πλαστικών, κεραμικών κτλ.) είναι η δυνατότητα απόκτησης της επιθυμητής αντοχής κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου μέσω του προσανατολισμού των νημάτων του υφάσματος. Εάν η διεύθυνση του φορτίου είναι σταθερή, τότε είναι εύλογο να χρησιμοποιηθεί ύφασμα μιας κύριας διεύθυνσης στο οποίο τα κύρια νήματα είναι τοποθετημένα κατά μια μόνο διεύθυνση έτσι ώστε η μέγιστη αντοχή του υφάσματος να είναι κατά τη διεύθυνση αυτή. Σε αυτό τον τύπο υφάσματος υπάρχουν και λίγα δευτερεύοντα, αμελητέας σημασίας νήματα κάθετα προς την κύρια διεύθυνση με σκοπό να συγκρατούν με απλή πλέξη τα κύρια νήματα (Gibson A.G., 2000).



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση νημάτων σε μια διεύθυνση καθώς και των δευτερευόντων νημάτων (<http://www.redstar.gr>).

Στην περίπτωση που τα φορτία είναι στο επίπεδο κατά τις δυο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε στην κατασκευή του σύνθετου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ύφασμα με κύρια νήματα τοποθετημένα κατά δυο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση ο αριθμός των νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι ακριβώς ίσος με τον αριθμό νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Επομένως και η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια κατά τις δυο αυτές διευθύνσεις και είναι η μέγιστη. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου της ορθής γωνίας που σχηματίζουν τα κύρια νήματα, δηλαδή κατά τη διεύθυνση που σχηματίζει γωνία $\theta = 45^\circ$ με τις κύριες διευθύνσεις.

Ένα τέτοιο επίπεδο σύνθετο υλικό που παρουσιάζει αυτή την αντοχή κατά διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, ονομάζεται "ορθότροπο". Παρομοίως ονομάζεται ορθότροπο και το τρισδιάστατο σύνθετο υλικό που έχει τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων ελαστικότητας του και γενικότερα των μηχανικών του ιδιοτήτων. Το σύνθετο υλικό που υπο οποιαδήποτε διεύθυνση (ή γωνία θ) στο επίπεδο του παρουσιάζει αυτές τις μηχανικές ιδιότητες, ονομάζεται δισδιάστατο "ισότροπο" υλικό. Στον τρισδιάστατο, χώρο αυτό το υλικό είναι και ονομάζεται "σχεδόν ισότροπο". Ισότροπα υλικά είναι τα μέταλλα, ενώ σύνθετα δε μπορούν να υπάρξουν αφού σε αυτή τη περίπτωση τα νήματα θα έπρεπε να είναι προσανατολισμένα προς κάθε διεύθυνση στο χώρο, πράγμα αδύνατο.



Σχήμα 2.4: α) Κατασκευή σύνθετου μιας διεύθυνσης με 8 στρώσεις νημάτων κατά την ίδια διεύθυνση, β) Κατασκευή σύνθετου ισότροπου με 8 στρώσεις νημάτων κατά διευθύνσεις $0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ$ (<http://www.redstar.gr>).

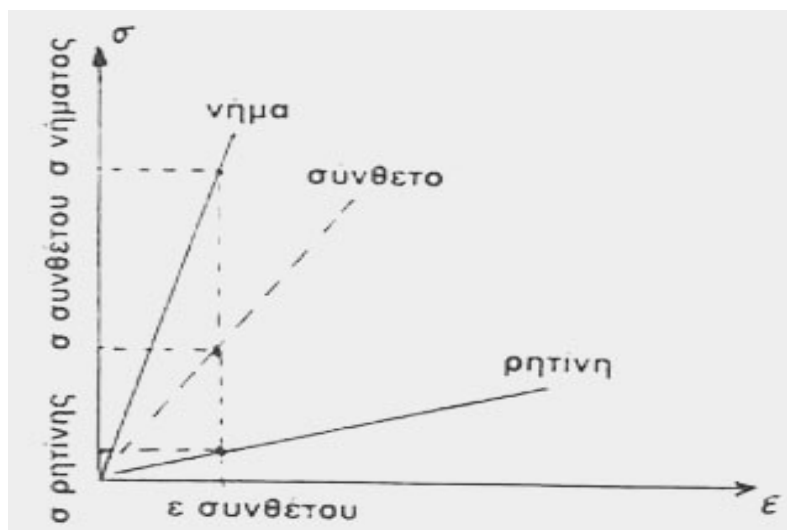
Είναι ευκολονόητο επομένως ότι τα σύνθετα υλικά είναι γενικώς “ανισότροπα” υλικά, ενώ μπορούν να γίνουν με τον κατάλληλο αριθμό στρωμάτων και κατεύθυνσης των νημάτων, υλικά “δισδιάστατα ισότροπα”. Η ρητίνη παίζει σημαντικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού. Η ποσοστιαία αναλογία του βάρους της ρητίνης προς το συνολικό βάρος του σύνθετου (ρητίνης και υφάσματος) είναι ένα βασικό στοιχείο της σύνθεσης, και συνήθως το ποσοστό του βάρους της ρητίνης κυμαίνεται από 25-50% του συνολικού βάρους. Οι δυο τύποι ρητινών, είναι οι πολυεστερικές και οι εποξειδικές, οι πολυεστερικές έχουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες από τις εποξειδικές και γι’ αυτό δε χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές. Μερικές γνωστές εποξειδικές ρητίνες είναι η CibaGeigy 604, η DowDer 331, η Safe-T-Poxy 2410, η EA 9309 και άλλες (Gibson A.G., 2000).

Πίνακας 1.2: Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών νημάτων και σύνθετων υλικών.

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας E kg/mm ²	Μεγ. Τάση Εφελκυσμού σ kg/mm ²	Ειδικό Βάρος γ kg/cm ³	Ειδικό Μέτρο E/γ × 10 ⁵	Ειδική Τάση σ/γ × 10 ⁵ (σ _υ)
E-Υαλονήματα	7350	320	2550	2,9	1,25
S-Υαλονήματα	8400	380	2490	3,4	1,53
E-Υαλονήματα εποξειδ.	5250	140	1940	2,7	0,72
S-Υαλονήματα εποξειδ.	5250	210	1940	2,7	1,08
Κέβλαρ 29	6300	350	1440	4,4	2,43
Κέβλαρ 49	14000	350	1660	8,4	2,11
Κέβλαρ 49/εποξειδ.	8400	200	1520	5,5	1,32
HM Νήματα Γραφίτη	38500	210	1910	20,2	1,10
HS Νήματα Γραφίτη	24500	245	1770	13,8	1,38
HM Γραφίτη εποξειδ.	21000	95	1605	13,1	0,59
HS Γραφίτη εποξειδ.	15400	145	1495	10,3	0,97
Νήματα Βορίου	42000	280	2630	16	1,06
Νήματα Βορίου/εποξειδ.	21700	155	2075	10,5	0,75
Αλουμινίου 7075-T6	7200	55	2685	2,7	0,20
Αλουμινίου 6061-T6	7200	30	2685	2,7	0,11
Τιτάνιο Ti-6Al- 4V	11200	105	4430	2,5	0,24
Χρόμιο Μολυβδενιούχος	20300	95	7830	2,6	0,12

Στο Πίνακα 1.2, δίνονται ορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά διαφόρων νημάτων και σύνθετων υλικών. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση εφελκυσμού των υαλονημάτων είναι σχεδόν επταπλάσιες από εκείνες του κράματος αλουμινίου AL7075-T6. Τα συνηθέστερα και χαμηλότερου κόστους σύνθετα υλικά που συναντώνται στις απλές αεροπορικές κατασκευές είναι τα E-Υαλοϋφάσματα/Εποξειδική και τα S-Υαλοϋφάσματα/Εποξειδική. Τα πηλίκα E/γ (ειδικό μέτρο ελαστικότητας) και σ/γ (ειδική τάση), είναι βασικές παράμετροι για τη σωστή επιλογή του υλικού.

Επίσης στην επιλογή του κατάλληλου σύνθετου υλικού συμβάλλουν τα διαγράμματα (σ-ε), Σχήμα 2.5. Η καμπύλη (σ-ε) ενός σύνθετου υλικού βρίσκεται πάντοτε μεταξύ των καμπυλών (σ-ε) του νήματος και της ρητίνης, ενώ η κλίση της εξαρτάται από την αναλογία σε βάρος ρητίνης-νήματος. Εάν το ποσοστό βάρους της ρητίνης είναι μεγαλύτερο, τότε η καμπύλη (σ-ε) του σύνθετου θα είναι πλησιέστερη προς την (σ-ε) της ρητίνης και παρομοίως εάν το ποσοστό βάρους του νήματος είναι μεγάλο τότε η (σ-ε) του σύνθετου θα είναι πλησιέστερη προς την (σ-ε) του νήματος.



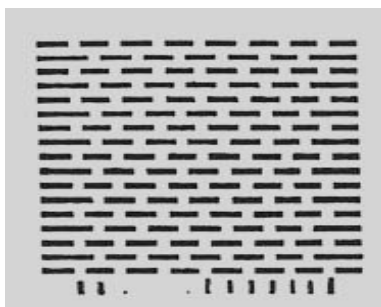
Σχήμα 2.5: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) (<http://www.redstar.gr>).

2.1.1.2 Είδη υφασμάτων

Τα βασικότερα είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές, είναι τα ακόλουθα :

- E - Υαλοϋφάσματα (Electrical)

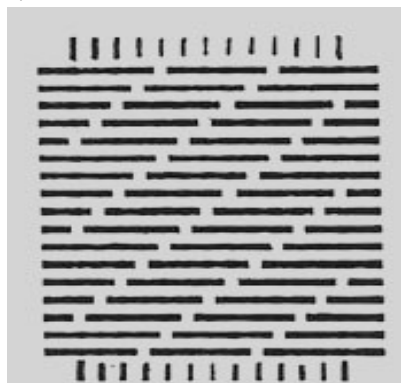
Το υαλούφασμα είναι το συνηθέστερο υλικό που χρησιμοποιείται στις σύνθετες κατασκευές. Είναι υλικό που δεν καίγεται, δε σαπίζει, δεν απορροφά υγρασία και δεν αλλοιώνεται με το χρόνο. Επίσης, έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη (σ - ϵ) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης και παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή αντοχή στα φορτία. Βρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ριναίου κώνου κτλ.



Σχήμα 2.6α : Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 1 επάνω 1 κάτω τύπου E-Υαλοϋφάσματος (<http://www.redstar.gr>).

- S – Υαλούφασμα (Structual)

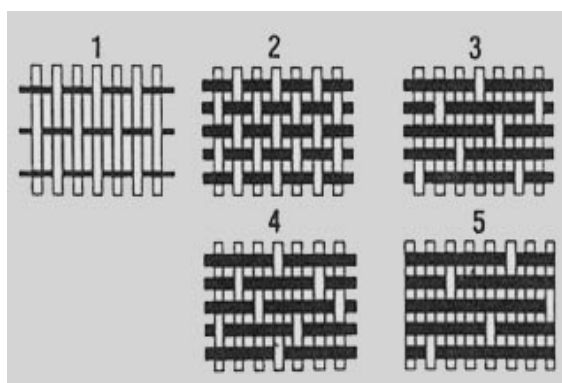
Έχει τις ίδιες περίπου ιδιότητες με το E – Υαλούφασμα αλλά υπερέχει αυτού κατά 20% στην αντοχή και 15% στο μέτρο ελαστικότητας. Ο τύπος S-ΥΥ (ΥαλοΥφασμα)είναι ελαφρύτερος από τον E-ΥΥ, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη κρούση και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τον E-ΥΥ. Χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία και σε συνδυασμό με το E-ΥΥ για εξωτερικές δεξαμενές, για δοχεία καυσίμων, για δοχεία υψηλής πίεσης, για ριναίους κώνους κτλ.



Σχήμα 2.6β : Αποτύπωμα πλέξης νημάτων 4 επάνω 1 κάτω τύπου S – Υαλοϋφάσματος (<http://www.redstar.gr>).

- S2 – Υαλούφασμα

Είναι παραλλαγή του S – Υαλοϋφάσματος με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά είναι ποιοτικώς περισσότερο ευέλικτο και δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στις προδιαγραφές MIL-SPEC, όπως αντιθέτως συμβαίνει με τον τύπο S – Υαλοϋφάσματος. Χρησιμοποιείται σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές, για δομικά στοιχεία που απαιτούν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, για δοχεία υψηλής πίεσης και για τμήματα που καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι το S2 – Υαλοϋφασμα διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και άνω των 800°C.

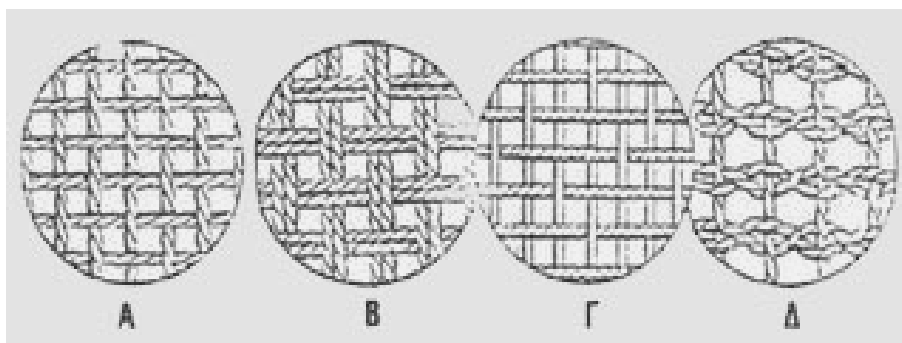


Σχήμα 2.6γ : Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοϋφάσματος, 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω 1 κάτω, 3) Τύπου HS 1 επάνω 4 κάτω, 4) Τύπου Crowfoot 1 επάνω 3 κάτω, 5) Τύπου BMS.

- Κέβλαρ

Πρόκειται για ένα ανόργανο υλικό με πολύ στερεούς μοριακούς δεσμούς και έχει την υψηλότερη σχέση αντοχής προς βάρος (σ/γ) από οποιαδήποτε άλλο ύφασμα. Το κέβλαρ είναι κατά 35% - 40% περίπου ελαφρύτερο από το υαλούφασμα, έχει μεγαλύτερη ειδική τάση και μεγαλύτερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας, από οποιοδήποτε υαλούφασμα, έχει περίπου τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής με τον γραφίτη, επομένως μπορούν να συνεργαστούν σε υβριδικές συνθέσεις, δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητες του και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου και τέλος έχει κατά δέκα φορές περίπου μεγαλύτερη ειδική τάση από το αλουμίνιο. Το κέβλαρ εμποτίζεται όπως το υαλούφασμα με εποξειδικές ρητίνες αλλά το σύνθετο υλικό που αποκτάται είναι κατά 20% περίπου ελαφρύτερο από το αντίστοιχο με υαλούφασμα.

Όλες οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου με κέβλαρ είναι πολύ καλές εκτός από την αντοχή του σε φορτία θλίψης όπου παρουσιάζει μικρές τιμές. Για τέτοιου είδους φορτία γίνονται υβριδικές συνθέσεις υφασμάτων κέβλαρ και γραφίτη, ή υαλούφασματος, με τις οποίες αποκτώνται οι επιθυμητές αντοχές. Το κέβλαρ έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κρούση από το υαλούφασμα, μεγάλη αντοχή στην κόπωση, καλή αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών και καλή απόσβεση των κραδασμών. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές για την κατασκευή δομικών στοιχείων, για την κατασκευή ελίκων οι οποίες γίνονται ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες του αλουμινίου και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην κόπωση.



Σχήμα 2.7δ : Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος κέβλαρ, Α) Απλή πλέξη, Β) Πλέξη μπάσκετ, Γ) Σατέν, Δ) Λινό (<http://www.redstar.gr>).

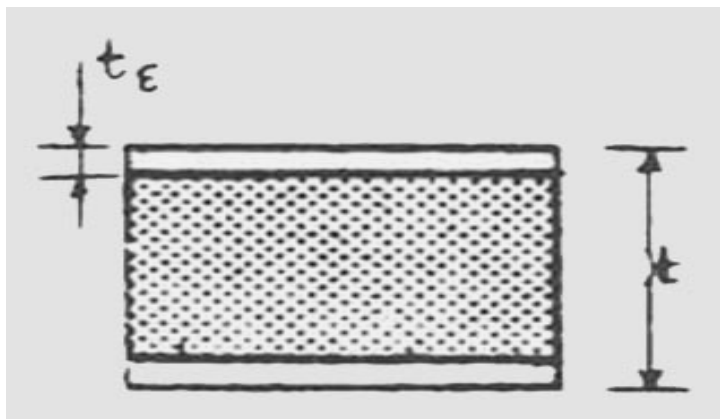
- Ανθρακονήματα

Τα ανθρακονήματα καθώς και τα υφάσματα τους είναι υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, δηλαδή υψηλή τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας (E/γ). Τα ανθρακονήματα έχουν περισσότερο από το διπλάσιο ειδικό μέτρο ελαστικότητας από εκείνο του κέβλαρ, και πάνω από τέσσερις φορές των υαλούφασμάτων. Είναι το ακριβότερο υλικό για σύνθετα, εφόσον κοστίζει περίπου πέντε φορές περισσότερο από το κέβλαρ, το οποίο με τη σειρά του κοστίζει τρεις φορές περισσότερο από το υαλούφασμα. Τα σύνθετα υλικά που αποκτώνται με ανθρακονήματα παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση στην παραμόρφωση, έχουν πολύ μεγάλη αντοχή στην κόπωση, αλλά είναι σχετικά εύθραυστα και δεν εμποδίζουν την ανάπτυξη ρωγμών.

Η χρησιμοποίηση των ανθρακονημάτων και των υφασμάτων τους είναι πολύ δυσκολότερη από εκείνη των άλλων υφασμάτων, απαιτεί ειδικές μεθόδους εφαρμογής, μεγάλη εμπειρία, ειδικό τρόπο σχεδίασης ώστε να αποφεύγονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και γνώσεις για υβριδικές συνθέσεις εφ' όσον θα χρειαστεί να συνδυαστούν οι ιδιότητες και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά με των αντίστοιχων άλλων υφασμάτων. Τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ισχυρών δομικών στοιχείων, για την κατασκευή των δοκών της πτέρυγας κ.α.

2.1.1.3 Σύνθετα στρωματοειδή (σάντουιτς)

Εκτός από τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν με τον εμποτισμό σε ρητίνες των διάφορων τύπων νημάτων και υφασμάτων, σύνθετα υλικά αποκτώνται και με κατάλληλο μηχανικό συνδυασμό εντελώς διαφορετικών υλικών. Ο γνωστότερος και επικρατέστερος μηχανικός συνδυασμός είναι εκείνος βάση του οποίου αποκτώνται σύνθετα υλικά υπο τη μορφή στρωμάτων.



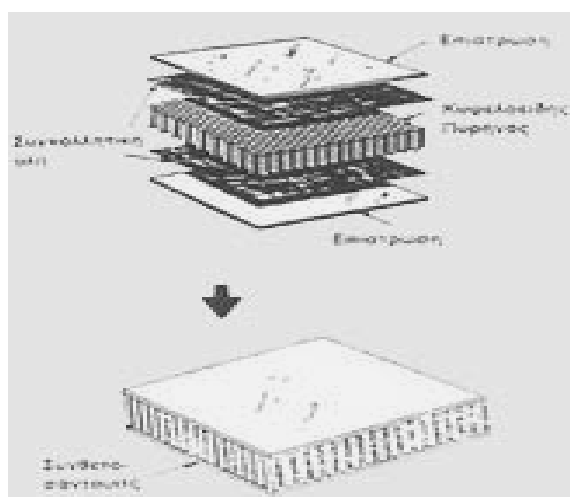
Σχήμα 2.8: Σχηματική παράσταση σύνθετου σάντουιτς με t :πάχος σάντουιτς και t_{ϵ} :πάχος επίστρωσης (<http://www.redstar.gr>).

Αυτά τα υλικά αποτελούνται από ένα πυρήνα και τις επιστρώσεις των δυο κύριων επιφανειών του. Ο πυρήνας είναι από ελαφρύ υλικό που κύριο σκοπό έχει τη μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δυο επιστρώσεων, οι οποίες με τη σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης εφαρμοσμένες στο επίπεδό τους. Το υλικό και το πάχος των επιστρώσεων, το υλικό του πυρήνα, το πάχος του πυρήνα και το επικολλητικό μέσο, είναι οι παράμετροι που καθορίζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου. Στο πίνακα 1.3, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του πάχους στα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και η πολύ μικρή αύξηση του βάρους με την αύξηση του πάχους.

Πίνακας 1.3: Συγκριτικός πίνακας επίδρασης πάχους t στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου σάντουιτς.

ΠΑΧΟΣ	t	$2t$	$4t$
ΑΚΑΜΨΙΑ	1,0	7,0	37,0
ΑΝΤΟΧΗ	1,0	3,5	9,2
ΒΑΡΟΣ	1,0	1,03	1,06

Εάν η επικόλληση δεν είναι ιδανική, τότε υπάρχει περίπτωση να παύσει η συνεργασία των επί μέρους υλικών και επομένως να απολέσουν τα αναμενόμενα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου στρωματοειδούς. Σκοπός της επικόλλησης είναι να μην επιτρέπει σχετικές κινήσεις μεταξύ επιστρώσεων και πυρήνα καθώς και την παρεμπόδιση της δημιουργίας ρυτιδώσεων στην επίστρωση κατά την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.



Σχήμα 2.9 : Κατασκευή σύνθετου σάντουιτς με κυψελοειδή πυρήνα (<http://www.redstar.gr>).

Σύνηθες στρωματοειδές αεροπορικό υλικό είναι το σύνθετο με πυρήνα από λεπτό έλασμα αλουμινίου (π.χ AL 5056-H39) με κυψελοειδή διαμόρφωση και επιστρώσεις από έλασμα αλουμινίου. Αυτός ο τύπος του σύνθετου χρησιμοποιείται για την κατασκευή δαπέδων αεροσκαφών, για την κατασκευή των πτερυγίων του στροφέιου ελικοπτέρων, για επικαλύψεις της ατράκτου, της πτέρυγας ή του ουριαίου πτερώματος, καθώς επίσης για τοπικές ενισχύσεις της επικάλυψης σε θυρίδες ή άλλες περιοχές όπου απαιτείται αυξημένη ακαμψία. Επίσης, σύνθετα με κυψελοειδή πυρήνα χαρτιού Kraft ή άλλου παρόμοιου χαρτιού και επίστρωση υαλοϋφάσματος, χρησιμοποιούνται συχνά στις εσωτερικές επενδύσεις, στα τοιχώματα και στην οροφή. Σύνθετα με πυρήνα Nomex χρησιμοποιούνται για τα εσωτερικά τοιχία και στις επενδύσεις των επιβατικών αεροσκαφών. Παράδειγμα σύνθετων στρωματοειδών υλικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4: Συνδυασμοί υλικών, πυρήνα και επιστρώσεων στα σύνθετα στρωματοειδή υλικά σε αεροπορικές εφαρμογές.

ΠΥΡΗΝΑΣ	ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ	ΥΛΙΚΟ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ
Πολυουρεθάνης	Υαλούφασμα	Εποξειδική
Πολυεστερικό Foam	Κόντρα πλακέ	>>
Πολυεστερικό Foam	Έλασμα αλουμινίου	-
Ξύλο Balsa	Κόντρα πλακέ	-
Ξύλο Balsa	Έλασμα αλουμινίου	-
Ξύλο Balsa	Υαλούφασμα	-
Κυψέλες αλουμινίου	Έλασμα αλουμινίου	-
Κυψέλες αλουμινίου	Υαλούφασμα	-
Κυψέλες χαρτιού Kraft	Έλασμα αλουμινίου	-
Κυψέλες χαρτιού Kraft	Υαλούφασμα	-
Κυψέλες χαρτιού Kraft	Χαρτί Kraft	-
Χαρτί Nomex	Υαλούφασμα	-

2.1.2 Επισκευές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά εκτός από την προσοχή, προγραμματισμό και επιμέλεια που απαιτούν κατά τη σύνθεσή τους, έχουν και συγκεκριμένες διαδικασίες για τον τρόπο επισκευής τους οι οποίες πρέπει να ακολουθηθούν, ώστε να αποκατασταθεί η ζημιά και συγκεκριμένα η αντοχή της ζημιωμένης περιοχής. Ανάλογα με το είδος και την ένταση της ζημιάς, εφαρμόζεται και η αντίστοιχη μέθοδος επισκευής. Δυσκολότερη επισκευή είναι εκείνη που απαιτεί κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Ο βασικός εξοπλισμός για τέτοιου είδους επισκευές περιλαμβάνει, μια αντλία για τη δημιουργία κενού, μια ή περισσότερες βεντούζες αναρρόφησης αναλόγως την επιφάνεια προς επισκευή, ένα σύστημα θέρμανσης που συνήθως είναι λεπτό κάλυμμα με εσωτερική ηλεκτρική αντίσταση, όργανα ελέγχου για τη ρύθμιση της υποπίεσης και της θερμοκρασίας, υφάσματα θερμομόνωσης, διάτρητα νάιλον και απορροφητικά υφάσματα για την αντιμετώπιση περισσέυματος κόλλας που θα εμφανιστεί με την υποπίεση, κολλητική ταινία για στεγανοποίηση και ίσως άλλα εξαρτήματα που θα χρειαστούν ανάλογα με την περίπτωση επισκευής. Πάνω από όλα όμως απαιτείται εμπειρία που θα αποκτηθεί μόνο κατόπιν συνεχούς πειραματισμού και εξάσκησης, ειδικά στις επισκευές των σύνθετων υλικών για αεροπορικές εφαρμογές.

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ

Η Federal Aviation Administration καθορίζει τους κανονισμούς πυρασφάλειας για όλα τα υλικά που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται, και γενικότερα εφαρμόζονται σε όλο το παγκόσμιο τομέα των αερομεταφορών. Ειδικότερα όλα τα μη μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο εσωτερικό της καμπίνας των εμπορικών αεροσκαφών υπόκεινται στους κανονισμούς ευφλεκτότητας της FAA (Mouritz A. P., 2006),(M. Wilhelm, 2001). Ωστόσο υπάρχουν αρκετές πειραματικές δοκιμές πυρκαγιάς, υπο τη διεύθυνση της FAA, οι οποίες αξιολογούν την ευφλεκτότητα και τη συμπεριφορά της φωτιάς των υλικών τα οποία καθορίζονται στο πρότυπο FAR 25.853 (ISO 2685:1998). Η FAA θέτει τα όρια για την απόδοση των ιδιοτήτων των υλικών, ώστε να καθυστερείται η ανάφλεξη της φωτιάς στη καμπίνα, με σκοπό την αύξηση του χρόνου διαφυγής των επιβατών.

2.2.1 Ασφάλεια πληρώματος

Γνωρίζοντας ότι οι πυρκαγιές που εμφανίζονται εν ώρα πτήσης δεν μπορούν να είναι κάθε φορά όμοιες μεταξύ τους, το πλήρωμα πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένο προκειμένου να κατασβήσει άμεσα την εστία της φωτιάς χωρίς καμιά καθυστέρηση. Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιαστούν πρόσφατες συστάσεις που προέρχονται από έρευνες σε παρελθοντικά ατυχήματα αεροσκαφών καθώς και εργαστηριακές έρευνες που έχουν σαν σκοπό τη παρουσίαση των στρατηγικών και τεχνικών αντιμετώπισης φωτιάς σε κρυφές περιοχές.

Οι φωτιές που χαρακτηρίζονται ως μη ορατές ή απρόσιτες χρήζουν ειδικής μεταχείρισης, αφού η εστία τους πρέπει να αναγνωριστεί άμεσα από το πλήρωμα πριν γίνουν ανεξέλεγκτες. Σύμφωνα με την Federal Aviation Administration, οι ενέργειες που απαιτούνται για τη κατάσβεση μιας εστίας φωτιάς είναι αρκετά πολύπλοκες εξαιτίας της διαμόρφωσης των καμπινών του αεροσκάφους, επομένως γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη φόρμουλα αντιμετώπισης των εν πτήσει πυρκαγιών. Αυτό το στοιχείο, όμως, που βοηθάει το πλήρωμα στην αναγνώριση του κινδύνου και την εκτίμησή του είναι η εξοικείωση τους με τις κρυφές περιοχές των αεροσκαφών. Για παράδειγμα η περιοχή μεταξύ δαπέδου και χώρου αποσκευών, η οποία τυπικά περιέχει δέσμες καλωδίων, γραμμές ισχύος των υδραυλικών συστημάτων καθώς και άλλα ηλεκτρικά στοιχεία. Η περιοχή που βρίσκεται στην οροφή της καμπίνας περιέχει τα εξαρτήματα του συστήματος ψυχαγωγίας του αεροσκάφους, κάποια μέρη από το σύστημα κλιματισμού, καθώς και το σύστημα οξυγόνου για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης για τους επιβαίνοντες (Market T.R., 2007).

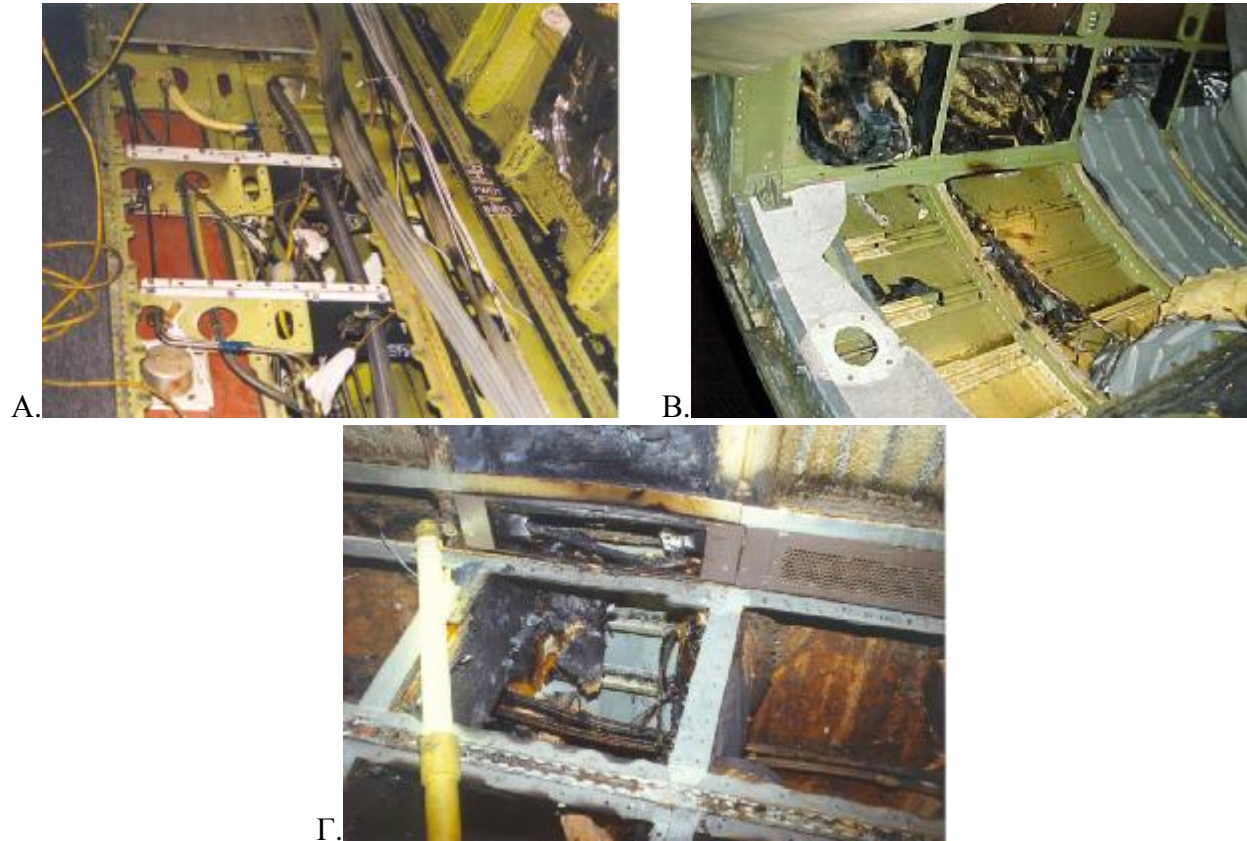
Σύμφωνα με την Federal Aviation Administration, τυχόν απώλεια στο σύστημα ελέγχου του αεροσκάφους, μπορεί να υποδεικνύει μια εξελισσόμενη εστία φωτιάς, και αυτό το φαινόμενο συμβαίνει γιατί κατά μήκος των γραμμών τροφοδοσίας των ηλεκτρικών συσκευών μπορεί να προκληθεί εστία φωτιάς. Γι' αυτό το λόγο όλα τα ηλεκτρικά συστήματα εποπτεύονται από ασφάλειες (circuit breakers) ώστε στη παραμικρή ένδειξη δυσλειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων το πλήρωμα να ενημερώνεται άμεσα.

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε από την FAA, για να καταγραφούν οι κύριες αιτίες που οδηγούν στην δημιουργία εστιών φωτιάς σε εν πτήσει αεροσκάφη, είναι οι ακόλουθες :

- i. Υπερθέρμανση καλωδιώσεων: Στις καλωδιώσεις τροφοδοσίας πολύ συχνά δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο (electrical arc) κατά μήκος αυτών με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των καλωδίων και την ανάφλεξή τους. Παράγοντες που εξελίσσουν ραγδαία τη φωτιά είναι η συγκεντρωμένη σκόνη επάνω στις καλωδιώσεις, καθώς και τυχόν λιπαντικές ουσίες επάνω τους. Επίσης δυσλειτουργικές ασφάλειες (circuit breakers) μπορούν να οδηγήσουν στην υπερθέρμανση των καλωδιώσεων.
- ii. Σε μικρότερο βαθμό, οι αστραπές έχουν οδηγήσει σε πρόκληση πυρκαγιάς και ο παράγοντας που βοηθά στην εξάπλωση της φωτιάς είναι τα κατεστραμμένα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη μόνωση του αεροσκάφους.
- iii. Στη τελευταία κατηγορία ανήκουν τα αεροσκάφη που χρησιμοποιούν θερμό αέρα από το κινητήρα για τη λειτουργία αρκετών διαδικασιών, όπως η θέρμανση παγωμένων περιοχών, η διατήρηση της πίεσης στα επιθυμητά επίπεδα στη καμπίνα, καθώς και στη λειτουργία πνευματικών μηχανισμών μετατροπής συμπιεσμένου αέρα σε μηχανική ενέργεια. Τυχόν απώλεια θερμού αέρα στις πνευματικές γραμμές τροφοδοσίας, μπορεί να προκαλέσει υψηλές θερμοκρασίες σε διάφορες περιοχές του αεροσκάφους και φθορές είτε να καταστρέψει τυχόν εξοπλισμό και μονωτικά υλικά του αεροσκάφους καθώς και στις καλωδιώσεις.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αιτιών παρουσιάζονται ως φωτογραφικό υλικό στη συνέχεια :

1. Φθορά στις ηλεκτρολογικές γραμμές του αεροσκάφους καθώς και στα μονωτικά υλικά που βρίσκονται στο χώρο κάτω από το δάπεδο (cheek) :



Εικόνα 2.1 : Εικόνες που προέρχονται από χώρο κάτω από το δάπεδο του αεροσκάφους (<http://www.faa.gov>).

2. Φθορά στα μονωτικά υλικά και στις καλωδιώσεις του αεροσκάφους, που βρίσκονται στην οροφή του :



A.



B.



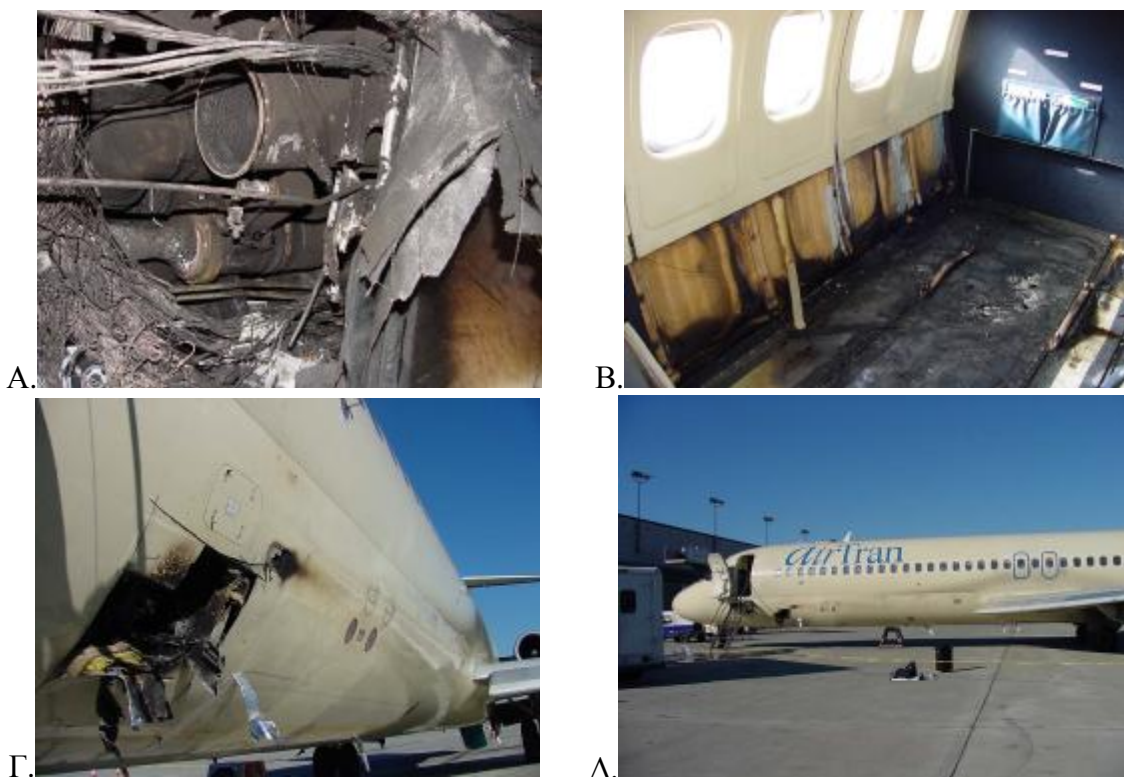
Γ.



Δ.

Εικόνα 2.2 : Εικόνες που προέρχονται από χώρο της οροφής του αεροσκάφους (Α,Β,Γ,Δ) (<http://www.faa.gov>).

3. Καταστροφή της εξωτερικής επιφάνειας του αεροσκάφους, από φωτιά που εξελίχθηκε στο χώρο αποθήκευσης εμπορευμάτων (cargo compartment) :



Εικόνα 2.3 : Εικόνες που προέρχονται από το χώρο αποθήκευσης εμπορευμάτων κτλ. (Α,Β,Γ,Δ) (<http://www.faa.gov>).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι εστίες δημιουργούνται σε μέρη που δεν είναι εύκολα προσβάσιμες στο πλήρωμα είτε δεν είναι εμφανή δια γυμνού οφθαλμού. Εάν ο χώρος που δημιουργήθηκε η φωτιά είναι αρκετά μεγάλος, το έργο της κατάσβεσής της θα είναι πολύ δύσκολο γιατί θα πρέπει το μέσο πυρόσβεσης να έρχεται σε επαφή με την εστία της φωτιά, και όχι να χρησιμοποιείται τυχαία στο χώρο. Γι' αυτό το λόγο, πρέπει να επιτυγχάνεται η είσοδος του πληρώματος σε οποιαδήποτε μέρος του αεροσκάφους, με οποιαδήποτε τρόπο. Σύμφωνα με την FAA, εάν ο μοναδικός τρόπος για να επιτευχθεί η είσοδος του πληρώματος σε χώρο φωτιάς για την αποφυγή καταστροφικών συνεπειών είναι το κόψιμο των εσωτερικών τοιχωμάτων της καμπίνας, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη το ρίσκο που θα λάβει το πλήρωμα εάν με το κόψιμο των τοιχωμάτων του αεροσκάφους δημιουργηθεί πρόβλημα στον εξοπλισμό του με συνέπεια τη δημιουργία μεγαλύτερων προβλημάτων. Γι' αυτό το λόγο το πλήρωμα οφείλει να είναι έμπειρο και να γνωρίζει τους χώρους του αεροσκάφους.

2.2.2 Διαχείριση πυρκαγιάς εν πτήση

Σύμφωνα με την Federal Aviation Administration, εάν το πλήρωμα υποπτευτεί πυρκαγιά εν ώρα πτήσης, οι πρώτες κινήσεις που πρέπει να γίνουν είναι το πλήρωμα να λάβει το κοντινότερο πυροσβεστήρα και να ελέγξει ποιο πάνελ της καμπίνας παρουσιάζει αυξημένη θερμοκρασία, το πιο πιθανό είναι η πυρκαγιά να εξελίσσεται πίσω από το πάνελ. Εάν δεν υπάρχει πόρτα για τη πρόσβαση στη φωτιά, τότε πρέπει να ανοιχτεί μια τρύπα με μεγάλη προσοχή. Σε αυτό το σημείο ο χειριστής του πυροσβεστήρα πρέπει να αναγνωρίσει το πυρήνα της φωτιάς, σε καμία περίπτωση ο χειριστής του πυροσβεστήρα δε πρέπει να σπαταλήσει το μέσο πυρόσβεσης όταν ο πυρήνας της φωτιάς δεν είναι εμφανής προς το χειριστή.

Από την άλλη μεριά, όταν σε ένα αεροσκάφος επιβαίνουν παραπάνω από ένας επιβάτες, τότε πρέπει να καταστρωθεί ένα ομαδικό πλάνο κατάσβεσης της φλόγας, όπου ο καθένας τους θα έχει ένα συγκεκριμένο ρόλο. Υποθέτουμε, πως σε ένα αεροσκάφος υπάρχουν δυο πιλότοι και τρεις επιβαίνοντες, όποιος από τους επιβαίνοντες που θα βρει πρώτος τα σημάδια της φωτιάς θα ενεργήσει ως τον πυροσβέστη. Ο δεύτερος επιβαίνοντας θα είναι ο συνδετικός κρίκος του πυροσβέστη και των πιλότων, και θα τους ενημερώνει συνεχώς για τη τοποθεσία της πυρκαγιάς και την εξέλιξή της, τον ακριβή αριθμό των πυροσβεστήρων που χρησιμοποιούνται καθώς και αν δημιουργούνται συνθήκες καπνού. Άλλο ένα καθήκον του συντονιστή είναι να ενημερώνει το πλήρωμα για τις εξελίξεις των ενεργειών τους καθώς επίσης να τους καθησυχάζει. Ένας άλλος επιβαίνοντας θα είναι υπεύθυνος για τη παροχή προμηθειών στο πυροσβέστη καθώς και στους υπόλοιπους επιβαίνοντες προμηθεύοντας τους πετσέτες για να καλύψουν τις μύτες τους.

2.2.3 Τύποι πυροσβεστήρων

Οι φωτιές που ξεσπούν σε ένα αεροσκάφος ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες, στις κλάσεις A, B, C και D αντίστοιχα. Η κάθε μια αναφέρεται σε φωτιές που ξεσπούν από στέρεες ύλες, από εύφλεκτα ρευστά, από τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό καθώς και από εύφλεκτα μέταλλα (<http://www.flightsafety.org>).

Οι φωτιές που χαρακτηρίζονται κλάση A και C είναι οι πιο σύνθητες φωτιές που εξελίσσονται εν ώρα πτήσης, επομένως το πλήρωμα πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίσει τη κλάση της φωτιάς ώστε να επιλεγεί ο σωστός πυροσβεστήρας. Αναλυτικά οι κλάσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια :

▼ Κλάση A

Πρόκειται για φωτιά που προέρχεται από ξύλο, χαρτί, ύφασμα ή πλαστικό. Ο συγκεκριμένος τύπος φωτιάς, για να αντιμετωπιστεί απαιτεί να ψυχρανθεί με κάποιο ρευστό. Συνήθως ο πυροσβεστήρας που χρησιμοποιείται, περιέχει σε μεγάλο ποσοστό νερό, όμως ως πυροσβεστικό μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε καφές, τσάι ακόμη και χυμός. Οι πιο αποτελεσματικοί πυροσβέστες, για φωτιές τύπου A, είναι του τύπου νερού/γλυκόλης. Σε καμία περίπτωση όμως, δε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως πυροσβεστικό μέσο κάποιο αλκοολούχο ρευστό. Ο καπνός της καύσης είναι συνήθως χρώματος γκρι προς καφέ. Μπορεί να είναι αρκετά πυκνός, ανάλογα βέβαια από τη ποσότητα της καύσιμης ύλης.

▼ Κλάση B

Πρόκειται για φωτιές που ξεσπούν από εύφλεκτα ρευστά όπως πίσσα, καύσιμα αεροσκάφους κλπ. Αυτός ο συγκεκριμένος τύπος φωτιάς δε μπορεί να αντιμετωπιστεί με νερό, αντίθετα απαιτείται πυροσβεστήρας αφρού. Ο καπνός που παράγεται από τη καύση συνήθως έχει μαύρο χρώμα, είναι αρκετά πυκνός και έχει έντονη οσμή πετρελαίου.

▼ Κλάση C

Πρόκειται για φωτιές που προέρχονται από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό του αεροσκάφους. Ο συγκεκριμένος τύπος φωτιάς πρέπει να αντιμετωπιστεί με ένα μη αγώγιμο μίγμα, ώστε να αποφευχθεί τυχόν κίνδυνος ηλεκτροπληξίας ή ζημιά στο ηλεκτρικό σύστημα του αεροσκάφους. Οι πιο αποτελεσματικοί τύποι πυροσβεστήρων για το συγκεκριμένο τύπο φωτιάς είναι αυτοί της γλυκόλης. Ο καπνός της συνήθως είναι χρώματος γκρι ή άσπρος. Διαχέεται αρκετά γρήγορα και έχει πικρή οσμή.

▼ Κλάση D

Πρόκειται για φωτιές που ξεσπούν από εύφλεκτα μέταλλα, όπως το νάτριο, το μαγνήσιο, το λίθιο και το κάλιο. Για την αντιμετώπιση των συγκεκριμένων πυρκαγιών απαιτούνται πυροσβεστήρες με ειδικές πούδρες, ώστε να αποφευχθεί τυχόν χημική αντίδραση μεταξύ της φλεγόμενης ύλης και του μέσου πυρόσβεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των σύνθετων υλικών στα σύγχρονα αεροσκάφη καθιστά την έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά τους σε συνθήκες φωτιάς επιτακτική ανάγκη, δεδομένου ότι αφορά την ασφάλεια των επιβατών και του πληρώματος. Πιο συγκεκριμένα ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των υλικών σε μη προσβάσιμες περιοχές του αεροσκάφους στις οποίες το ζητούμενο είναι η αποφυγή της έναρξης της φωτιάς και ο περιορισμός της εξάπλωσης της.

Σε αυτό το κομμάτι προκύπτουν κάποια ερωτήματα τα οποία ζητούν μια τεκμηριωμένη απάντηση η οποία βασίζεται σε πειραματικά αποτελέσματα. Αυτές αναφέρονται, στις συνθήκες κάτω από τις οποίες μια φωτιά μπορεί να ξεσπάσει και να εξαπλωθεί, ανεξάρτητα βέβαια από τις ιδιότητες των υλικών σε συνθήκες πυρκαγιάς. Επίσης πως επηρεάζουν τη πυρκαγιά τυχόν διαρροές στο σύστημα αερισμού, ο προσανατολισμός των τοποθετημένων πυρίμαχων υλικών, η ύπαρξη θερμικής ροής; Επίσης όταν μια ριπή αέρα πλησιάζει μια πηγή φωτιάς στο πέρασμα των κρυφών περιοχών η οποία έχει καταναλώσει το υπάρχον διαθέσιμο οξυγόνο της, μπορεί να ενισχύσει την ένταση της φωτιάς; Πως επηρεάζει την πυρκαγιά ο γεωμετρικός χώρος των κρυφών περιοχών;

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ

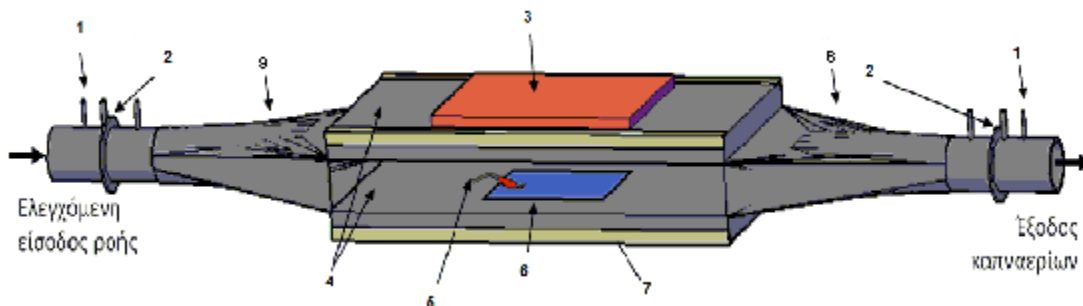
Για την διερεύνηση όλων των παραπάνω ερωτημάτων, θα κατασκευαστεί μια πειραματική διάταξη η οποία θα σχεδιαστεί για τη μελέτη των συνθηκών ανάφλεξης και εξάπλωσης της φωτιάς επάνω στα υλικά που τοποθετούνται σε μη προσβάσιμους χώρους των αεροσκαφών. Η πειραματική διάταξη θα προσομοιώνει το χώρο των κρυφών περιοχών καθώς επίσης θα παρέχει στον χειριστή της τον έλεγχο των συνθηκών εισόδου και εξόδου του συστήματος μέσω της ρύθμισης της παροχής του αέρα στο κανάλι εισαγωγής και στο θάλαμο καύσης.

Το κανάλι εισαγωγής είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μετράται έμμεσα η παροχή του ρευστού, μέσω ενός μετρητή διαφράγματος τύπου Orifice, και με χρήση οδηγών περυγίων επιτυγχάνεται ομαλοποίηση της ροής στο θάλαμο καύσης. Το κανάλι εισαγωγής επίσης, φέρει μετρητές θερμοκρασίας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ρευστού επιτυγχάνοντας διόρθωση της θερμοκρασίας εισόδου όταν αυτή μεταβάλλεται στο θάλαμο καύσης.

Ο θάλαμος καύσης είναι μορφής ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις $1,0 \times 0,4 \times 0,1 \text{ m}^3$. Το εσωτερικό του θαλάμου καύσης είναι θερμικά μονωμένο. Το δοκίμιο είναι διαστάσεων $0,29 \times 0,19 \text{ m}^2$ και βρίσκεται τοποθετημένο στο κέντρο της μιας από τις δυο μεγάλες πλευρές, εσωτερικά, πρόσωπο με την επιφάνεια. Το δοκίμιο δέχεται σχετικά χαμηλή ομοιόμορφη ροή θερμικής ακτινοβολίας από έναν επίπεδο θερμοπομπό, έτσι ώστε η

θερμοκρασία του να παραμένει κάτω από τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Η εξαναγκασμένη έναρξη της καύσης γίνεται με τη βοήθεια φλόγιστρου. Έτσι περνώντας η ελεγχόμενη ροή από το θάλαμο καύσης μεταξύ του θερμοπομπού και του δοκιμίου, αντιπροσωπεύεται το πέρασμα στις απρόσιτες περιοχές. Οι πλευρές του θαλάμου αποτελούνται από τζάμια τύπου quartz για τη συνεχή παρακολούθηση του φαινομένου.

Το κανάλι εξόδου φέρει οδηγία περύνια, όπως και στο κανάλι εισόδου, για την ομαλοποίηση της ροής, ένα μετρητή διαφράγματος για την έμμεση μέτρηση της παροχής καθώς και ένα θερμοκρασιακό μετρητή τύπου thermocouple για τη διόρθωση της τιμής της παροχής όταν αυτή μεταβάλλεται μέσα στο θάλαμο καύσης, συγκρίνοντας τη θερμοκρασιακή τιμή εισόδου με την αντίστοιχη τιμή εξόδου. Έπειτα τα καπναέρια οδηγούνται σε ένα σύστημα ποσοτικής και ποιοτικής ανάλυσης καθώς και μέτρηση των παραμέτρων όπως ο καπνός που απελευθερώνεται, ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (Heat Release Rate), κτλ. Επίσης το σύστημα είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ικανή η διεξαγωγή του πειράματος είτε σε οριζόντια θέση είτε σε κάθετη θέση. Η διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη προσομοίωσης απρόσιτων περιοχών.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας ο οποίος δηλώνει σε ποιο σημείο της πειραματικής συσκευής αντιστοιχεί το κάθε νούμερο του Σχήματος 3.1 :

Πίνακας 3.1: Αντιστοίχιση αριθμημένων σημείων με τα μέρη της πειραματικής συσκευής.

Σημείο 1	Θερμοζεύγος (Thermocouple)
Σημείο 2	Μετρητής παροχής (Orifice Plate)
Σημείο 3	Θερμοπομπός ακτινοβολίας (Flat Face Panel)
Σημείο 4	Πυρίμαχα μονωτικά υλικά
Σημείο 5	Φλόγιστρο (Burner)
Σημείο 6	Θέση δοκιμίου
Σημείο 7	Θερμοζεύγη (κάτω επιφάνεια δοκιμίου)
Σημείο 8	Ακροφύσια εισόδου και εξόδου

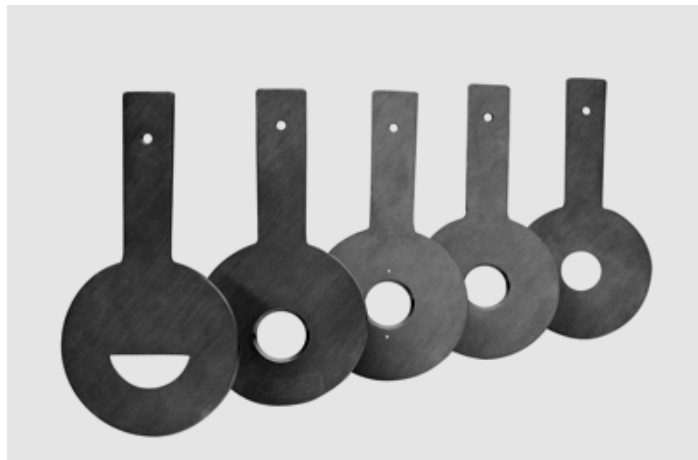
Με βάση το σχεδιασμό της πειραματικής συσκευής, επιτρέπεται στον χειριστή της συσκευής να καταγράφει τις συνθήκες ανάφλεξης και διατήρησης της φωτιάς καθώς και την εξάπλωση της επάνω στο δοκίμιο, σε συνάρτηση με τη ροή ακτινοβολίας του θερμικού στοιχείου και το χρόνο προθέρμανσης, τις συνθήκες ροής του αέρα, την ισχύ και το χρόνο λειτουργίας του φλόγιστρου και τον προσανατολισμό του δοκιμίου. Επομένως τα

αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν από τις πειραματικές μετρήσεις, είναι τα ακόλουθα :

- ✓ Θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο της συσκευής.
- ✓ Τη μαζική παροχή του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο της συσκευής.
- ✓ Τη θερμοκρασία στο κάτω μέρος των υπο δοκιμή υλικών.
- ✓ Την ολική απώλεια μάζας του υλικού.
- ✓ Το ρυθμό απώλειας της θερμότητας.
- ✓ Τις συγκεντρώσεις των καπναερίων σε οξυγόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και σε διοξείδιο του άνθρακα.
- ✓ Τη παραγωγή του καπνού.
- ✓ Τη σύσταση των καπναερίων μέσω της μεθόδου FTIR.

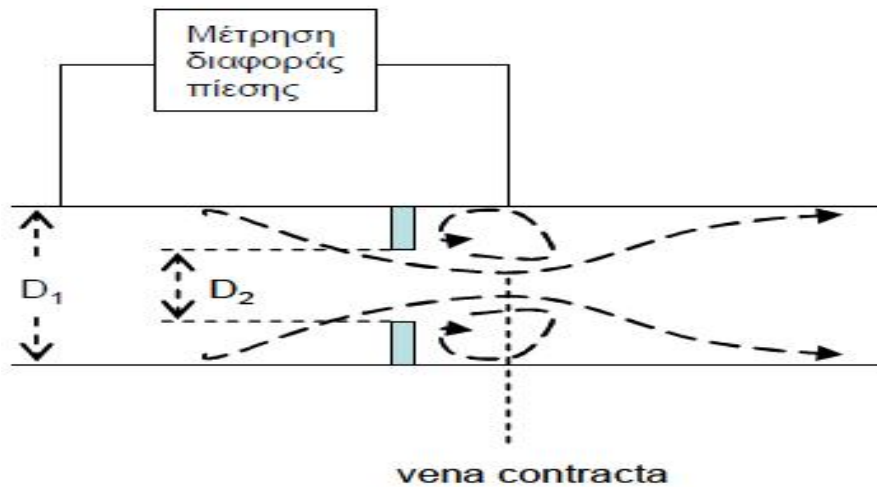
3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΡΟΧΗΣ

Η συσκευή η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ογκομετρικής παροχής του ρευστού είναι ο μετρητής διαφράγματος τύπου orifice. Επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος μετρητής, αφού είναι απλός στη κατασκευή του και στην τοποθέτηση του και μας παρέχει μεγάλη περιοχή μέτρησης. Ο συγκεκριμένος μετρητής, *Εικόνα 3.1*, μετρά τη παροχή μέσω της μέτρησης της πτώσης πίεσης μεταξύ της ανάντη και της κατάντη πλευράς του μετρητή. Η συσκευή αποτελείται από ένα τμήμα ευθύγραμμο αγωγού, που προσαρμόζεται στο μέρος του αγωγού στο οποίο θέλουμε να γίνει η μέτρηση. Το ρευστό θα πρέπει να φτάνει στη συσκευή με πλήρως ανεπτυγμένο προφίλ ταχύτητας και γι' αυτό το λόγο χρειάζεται αρκετό μήκος ευθύγραμμου αγωγού πριν και μετά της συσκευή μέτρησης.



Εικόνα 3.1: Μετρητές διαφράγματος διάφορων τύπων (<http://www.avcovalve.com>).

Κατά τη διέλευση του ρευστού από το μετρητή, η διάμετρός του στενεύει απότομα με αποτέλεσμα την αποκόλληση του κύριου ρεύματος του ρευστού από τα τοιχώματα του αγωγού μετά το σημείο της στένωσης, λόγω αδράνειας, και τη δημιουργία στροβίλων ανακυκλοφορίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω *Σχήμα 3.2* :



Σχήμα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση του διαφράγματος και της ροής του ρευστού μέσα από αυτό.

Η vena contracta, δεν σχηματίζεται στη φυσική στένωση του μετρητή αλλά λίγο παρακάτω από αυτή. Κατά μήκος της συσκευής, όσο πλησιάζει η ροή στη στένωση η ταχύτητά της αυξάνεται βάσει της διατήρησης της μάζας του ρευστού οπότε η πίεση μειώνεται βάσει της εξίσωσης Bernoulli (ισοζύγιο μηχανικής ενέργειας). Η πίεση του ρευστού γίνεται ελάχιστη στη vena contracta. Η διαφορά πίεσης μεταξύ της ελεύθερης ροής στον αγωγό και της vena contracta (κατ' εκτίμηση μετά την φυσική στένωση) είναι το μέγεθος που μετράται άμεσα με τη βοήθεια ενός ψηφιακού μετρητή διαφορικής πίεσης (Differential Pressure Transmitter). Καθώς η ροή απομακρύνεται από τη στένωση η ταχύτητα μειώνεται και η πίεση αυξάνεται. Η αρχική πίεση όμως δεν ανακτάται λόγω των μη αντιστρεπτών απωλειών σε τριβές. Η τελική απώλεια πίεσης, εξαιτίας της δημιουργίας στροβίλων, είναι πολύ μεγάλη στο διάφραγμα.

Για να συνδέσουμε τη μετρούμενη διαφορά πίεσης στο σημείο 1 της ανάντη πλευράς του μετρητή και στο σημείο 2 της κατόντη πλευράς του, πρώτα θα χρησιμοποιήσουμε το ισοζύγιο μάζας μεταξύ των δυο σημείων :

$$Q = Q_1 = Q_2 \Leftrightarrow Q = u_1 \cdot A_1 = u_2 \cdot A_2 = ct \Rightarrow Q = \frac{\rho \cdot D_1^2 \cdot u_1}{4} = \frac{\rho \cdot D_2^2}{4} \quad (3.1)$$

όπου : Q ογκομετρική παροχή

D_1, D_2, u_1, u_2 διάμετροι και ταχύτητες στις διατομές ροής για τα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα

Στη συνέχεια εφαρμόζουμε την εξίσωση Bernoulli στα σημεία 1 και 2 αντίστοιχα, σε οριζόντια θέση :

$$\frac{P_1 - P_2}{r} + \frac{u_2^2}{2 \cdot a_2} - \frac{u_1^2}{2 \cdot a_1} + W = 0 \quad (3.2)$$

όπου : P_1, P_2 πιέσεις στα σημεία 1 και 2
 ρ πυκνότητα ρευστού στον αγωγό
 W ρυθμός απώλειας ενέργειας ανά μονάδα μάζας λόγω τριβών
 a_1, a_2 συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας στα σημεία 1 και 2

Οι συντελεστές a_1, a_2 εξαρτώνται από τις κατανομές της ταχύτητας στις αντίστοιχες διατομές. Οι κατανομές αυτές όμως είναι άγνωστες. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.1) και (3.2) βρίσκουμε για την ογκομετρική παροχή του ρευστού :

$$Q = \frac{\rho \cdot D_2^2}{4} \cdot e \cdot \left(\frac{2(P_1 - P_2)}{r} - W \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{a_1} - \frac{D_2^4}{D_1^4 \cdot a_1} \right) \quad (3.3)$$

Στη παραπάνω εξίσωση τόσο οι απώλειες λόγω τριβής W όσο και οι συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας a_1, a_2 είναι άγνωστοι. Ο συντελεστής, e , ονομάζεται συντελεστής διαστολής και χρησιμοποιείται στη σχέση μας προκειμένου να υπολογιστεί το εμβαδό της κατάντης περιοχής A_2 . Για να συνδυάσουμε όλους τους αγνώστους σε έναν παράγοντα καθώς και τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας σε θερμότητα, ορίζουμε την ιδανική παροχή Q_i , η οποία είναι η παροχή που αντιστοιχεί στη μέτρησή μας εάν οι απώλειες ήταν μηδενικές ($W=0$), τους συντελεστές διόρθωσης ίσους με τη μονάδα (a_1, a_2), και η ροή να είχε καθαρά στρωτό χαρακτήρα προκύπτει ότι :

$$Q_i = \frac{\rho \cdot D_2^2}{4} \cdot e \cdot \left(\frac{1}{1 - b^4} \right)^{(1/2)} \cdot \left(\frac{2(P_1 - P_2)}{r} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

όπου : $b = D_2/D_1$ λόγος διαμέτρων

Η πραγματική παροχή, Q , συνδέεται με την ιδανική παροχή, Q_i , μέσω του συντελεστή εκροής C :

$$Q = C \cdot Q_i \quad (3.5)$$

Επομένως ο συντελεστής C εξαρτάται :

- i. από τη γεωμετρία της συσκευής
- ii. από το λόγο των διαμέτρων $\beta = D_2/D_1$, και
- iii. από τον αριθμό Reynolds

3.3.1 Υπολογισμός συντελεστή ροής, C

Όπως αναφέραμε στη προηγούμενη παράγραφο ο συντελεστής ροής, C, είναι ανάλογος με το συντελεστή διαμέτρων, β , τον αριθμό Reynolds, καθώς και οι αποστάσεις των πιεζομετρικών οπών με το μετρητή διαφράγματος, L_1 και L_2 , δηλαδή $f(C) = (\beta, Re, L_1, L_2)$. Ο τρόπος υπολογισμού του κάθε όρου θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, ώστε μέσω αυτών να δειχθεί η τελική μορφή του συντελεστή.

3.3.1.1 Υπολογισμός διαμέτρων D_1 και D_2

Όταν ένα μαθηματικό πρόβλημα δε μπορεί να λυθεί με τον άμεσο υπολογισμό του, τότε απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού. Σύμφωνα με το ISO 5167, για τη περίπτωση του μετρητή διαφράγματος orifice απαιτούνται ορισμένοι υπολογισμοί προκειμένου να υπολογιστούν οι απαιτούμενες μεταβλητές (ISO 5167-2:2003).

Πίνακας 3.2: Διαχωρισμός μεταξύ ζητούμενων και γνωστών μεταβλητών

ΓΝΩΣΤΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	ΖΗΤΟΥΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ
Πυκνότητα, Ιξώδες, Διάμετρος αγωγού εισαγωγής, Διάμετρος μετρητή, Διαφορά πίεσης	Παροχή
Πυκνότητα, Ιξώδες, Διάμετρος αγωγού εισαγωγής, Διαφορά πίεσης, Μαζική παροχή	Διάμετρος μετρητή και Λόγος διαμέτρων
Πυκνότητα, Ιξώδες, Διάμετρος αγωγού εισαγωγής, Διάμετρος μετρητή, Μαζική παροχή	Διαφορά πίεσης
Πυκνότητα, Ιξώδους, Λόγος διαμέτρων, Διαφορά πίεσης, Μαζική παροχή	Διάμετρος αγωγού εισαγωγής, Διάμετρος μετρητή

Ουσιαστικά, η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου είναι ο διαχωρισμός των γνωστών μεταβλητών της εξίσωσης (3.4) σε ένα μέλος και οι υπόλοιπες άγνωστες τιμές μεταφέρονται στο άλλο μέλος. Το μέλος που αποτελείται από τις γνωστές τιμές θεωρείται το σταθερό μέρος και συμβολίζεται ως A_n . Έτσι προκύπτει μια επαναληπτική εξίσωση με δύο αγνώστους και μια γνωστή μεταβλητή. Στη συνέχεια υποθέτουμε μια τιμή για μια από τις δυο άγνωστες μεταβλητές και επιλύουμε την εξίσωση επανάληψης για να προσδιοριστεί και η δεύτερη άγνωστη μεταβλητή η οποία θα ονομαστεί ως X_n . Η διαφορά μεταξύ των δυο μελών είναι η δ_n (ISO 5167-2:2003).

Στη συνέχεια, τα X_1, X_2, δ_1 και δ_2 εισάγονται σε ένα γραμμικό αλγόριθμο που υπολογίζει τα $X_3 \dots X_n$ και $\delta_3 \dots \delta_n$ μέχρι το $|\delta_n|$ να είναι μικρότερο από μια δοσμένη τιμή, ή μέχρι δυο διαδοχικές τιμές των X ή των δ να είναι ίσες για μια δοσμένη ακρίβεια.

Ένα παράδειγμα ενός γραμμικού αλγόριθμου με γρήγορη σύγκλιση είναι ο ακόλουθος:

$$X_n = (X_{n-1} - d_{n-2}) \cdot \left(\frac{X_{n-1} - X_{n-2}}{d_{n-1} - d_{n-2}} \right) \quad (3.6)$$

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα πλάνο ενεργειών για τους επαναληπτικούς υπολογισμούς ανάλογα βέβαια με τη ζητούμενη και γνωστή τιμή, στο Πίνακα 3.3 :

Πίνακας 3.3: Πλάνο ενεργειών για επαναληπτικούς υπολογισμούς (ISO 5167-2:2003).

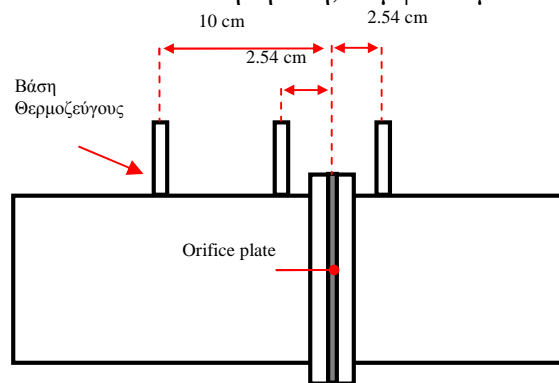
Πρόβλημα	$q=$	$D_2=$	$\Delta P=$	$D_1=$
Για γνωστές τιμές :	$\mu_1, \rho_1, D_1, D_2, \Delta P$	$\mu_1, \rho_1, D_1, \Delta P, q_m$	$\mu_1, \rho_1, D_1, D_2, q_m$	$\mu_1, \rho_1, \beta, q_m, \Delta P$
Παρακαλώ βρες :	q_m και q_v	D_2 και β	ΔP	D_2 και D_1
Σταθερά A_n :	$A_1 = \frac{\varepsilon D_2^2 \sqrt{2 \Delta P \rho_1}}{\mu_1 D_1 \sqrt{1 - \beta^2}}$	$A_2 = \frac{R_2 R \varepsilon D_1}{D_1 \sqrt{2 \Delta P \rho_1}}$	$A_3 = \frac{8(1 - \beta^4)}{\rho_1} \left(\frac{q_m}{C \pi D_1^2} \right)^2$	$A_4 = \frac{4 \varepsilon \beta^2 q_m \sqrt{2 \Delta P \rho_1}}{\pi \mu_1^2 \sqrt{1 - \beta^2}}$
Εξίσωση επανάληψης	$\frac{R \varepsilon D_1}{C} = A_1$	$\frac{C \varepsilon \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = A_2$	$\frac{\Delta P}{\varepsilon^{-2}} = A_3$	$\frac{R \varepsilon D_1}{C} = A_4$
Μεταβλητή στο γραμμικό αλγόριθμο :	$X_1 = R \varepsilon D_1 = C A_1$	$X_2 = \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{A_2}{C \varepsilon}$	$X_3 = \Delta P = \varepsilon^{-2} A_3$	$X_4 = R \varepsilon D_1 = \sqrt{C A_4}$
Κριτήριο ακρίβειας (όπου το n επιλέγεται από το χρήστη)	$\left \frac{A_1 - X_n}{A_1} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_2 - X_n C \varepsilon}{A_2} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_3 - X_n \varepsilon^2}{A_3} \right < 1 \times 10^{-n}$	$\left \frac{A_4 - X_n^2}{A_4} \right < 1 \times 10^{-n}$
Πρώτος άγνωστος :	$C = C_n$	$C = 0,606$ (orifice) $C = 1$ (nozzle or venturi) $\varepsilon = 0,97$	$\varepsilon = 1$	$C = C_n$ $D_1 = \infty$ (flange tapping)
Αποτελέσματα :	$q_m = \frac{\pi}{4} \mu_1 D_1 X_1$ $q_v = \frac{q_m}{\rho_1}$	$D_2 = D_1 \left(\frac{X_2}{1 + X_2^2} \right)^{0,25}$ $\beta = \frac{D_2}{D_1}$	$\Delta P = X_3$	$D_1 = \frac{4 q_m}{\pi \mu_1 X_4}$ $D_2 = \beta D_1$

Σκοπός αυτών των επαναλήψεων είναι ο προσδιορισμός της εσωτερικής διαμέτρου D_2 του μετρητή, καθώς επίσης και η διάμετρος D_1 του αγωγού εισαγωγής. Οι λεπτομερές υπολογισμοί θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3.1.2 Υπολογισμός αριθμού Reynolds

Επόμενο κομμάτι, είναι ο προσδιορισμός του αριθμού *Reynolds* στη κατάντη πλευρά του μετρητή orifice. Ο αριθμός Reynolds εξαρτάται από τη πυκνότητα του ρευστού, το ιξώδες του, τη ταχύτητα του ρευστού στη στένωση D_2 του μετρητή, καθώς και τη διάμετρο D_2 του μετρητή.

Η διάμετρος του μετρητή D_2 είναι γνωστή μέσω των παραπάνω επαναληπτικών υπολογισμών, επίσης και η ταχύτητα του ρευστού u_2 στη στένωση από την εξίσωση συνέχειας $Q = u \cdot A$. Η τιμή της πυκνότητας και του ιξώδους όμως απαιτούν υπολογισμό, γι' αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση ενός θερμοκρασιακού μετρητή ο οποίος θα τοποθετηθεί στο κανάλι εισόδου του ρευστού και σε κατάλληλη οπή, σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα 3.3 :



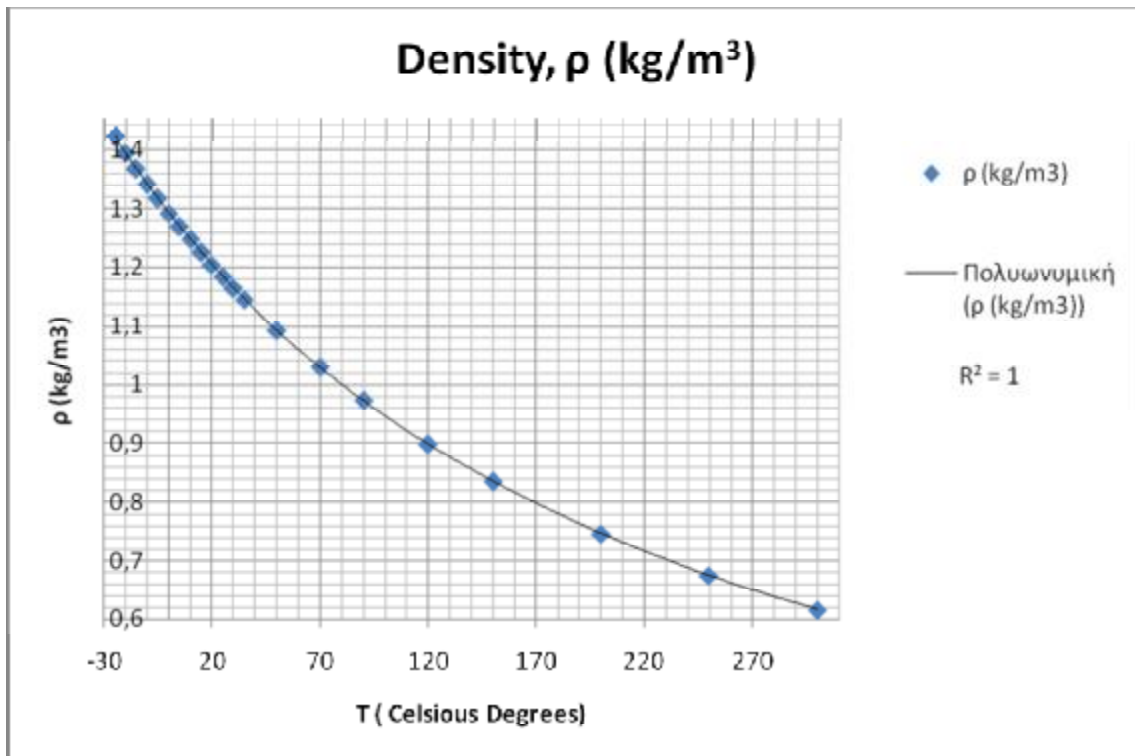
Σχήμα 3.3: Οπή τοποθέτησης μετρητικού οργάνου θερμοκρασίας

Επομένως η θερμοκρασία του διερχόμενου ρευστού θα είναι γνωστή μέσω της καταγραφής της, γεγονός που μας οδηγεί στη δημιουργία δυο συναρτήσεων $f(T, r)$ και $f(T, m)$ ώστε να επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της επιθυμητής πυκνότητας και του ιξώδους για κάθε θερμοκρασιακή τιμή. Έτσι, για το προσδιορισμό αυτών των συναρτήσεων χρειάζεται η δημιουργία ενός πίνακα με τις θερμοκρασιακές τιμές και τις αντίστοιχες τιμές της πυκνότητας και του ιξώδους, σύμφωνα με το Πίνακα 3.4 :

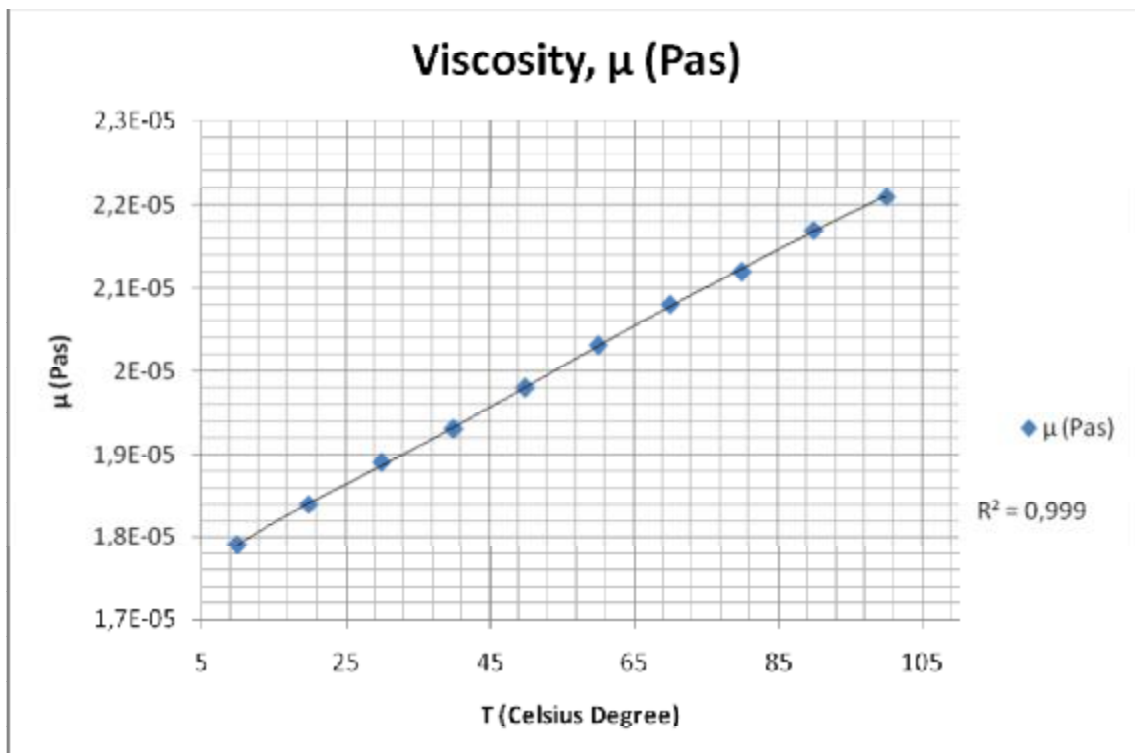
Πίνακας 3.4 : Τιμές θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες τιμές πυκνότητας και ιξώδους

T °C	(kg/m ³)	T °C	(Pas)
300	0,6157	10	0,0000179
250	0,6746	20	0,0000184
200	0,7459	30	0,0000189
150	0,8341	40	0,0000193
120	0,8977	50	0,0000198
90	0,9719	60	0,0000203
70	1,0286	70	0,0000208
50	1,0923	80	0,0000212
35	1,1455	90	0,0000217
30	1,1644	100	0,0000221
25	1,1839		
20	1,2041		
15	1,2250		
10	1,2466		
5	1,2690		
0	1,2920		
-5	1,3163		
-10	1,3413		
-15	1,3673		
-20	1,3943		
-25	1,4224		

Έπειτα, λαμβάνοντας τα παραπάνω στοιχεία δημιουργούμε τις αντίστοιχες γραφικές τους παραστάσεις *Σχήμα 3.4* και *3.5*, από τις οποίες εξάγουμε τις επιθυμητές εξισώσεις υπολογισμού:



Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση $f(T, r)$



Σχήμα 3.5: Γραφική παράσταση $f(T, m)$

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.4 η σχέση της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας είναι :

$$r = 1,29231 - 0,00473 \cdot T + 0,170486 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,538202 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 0,115419 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 0,11218 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 \quad (3.7)$$

Ενώ η σχέση του ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας, σύμφωνα με το Σχήμα 3.5 , είναι η ακόλουθη :

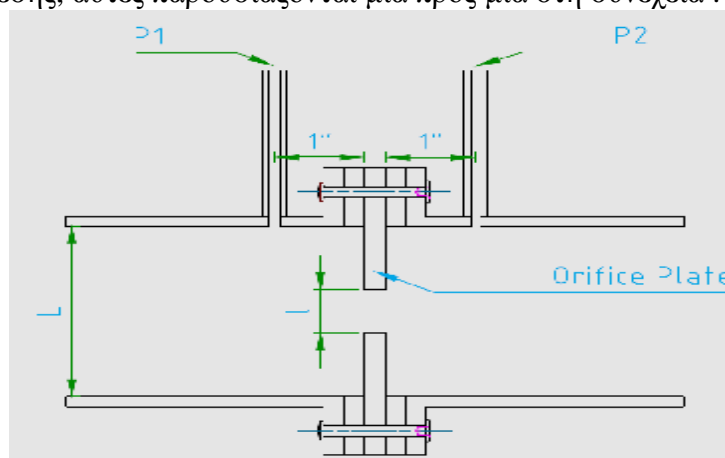
$$m = 0,001 \cdot \left[0,01827 \cdot \left(\frac{((0,555 \cdot 524,07) + 120)}{\left(0,555 \left((T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} \right) + 120 \right)} \right) \right] \cdot \left[\frac{\left((T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} \right)}{524,07} \right]^{1,5} \quad (3.8)$$

Αφού υπολογίστηκαν οι επιθυμητοί όροι για τον προσδιορισμό του αριθμού *Reynolds*, δε μένει τίποτε άλλο από τον υπολογισμό του μέσω της σχέσης :

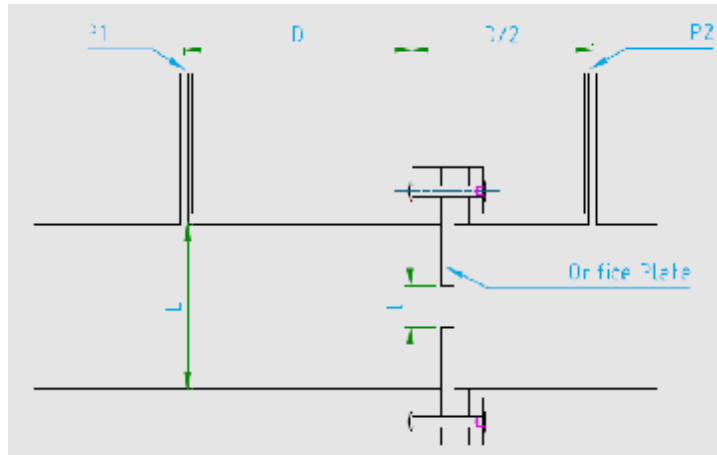
$$Re_{D_2} = \frac{D_2 \cdot u_2 \cdot r}{m} \quad (3.9)$$

3.3.1.3 Προσδιορισμό αποστάσεων L_1 και L_2

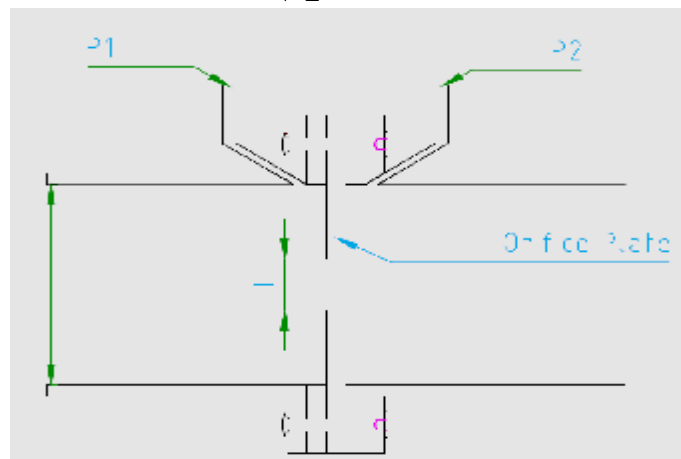
Για τον προσδιορισμό της παροχής του ρευστού, είναι απαραίτητη η τιμή της διαφορικής πίεσης μεταξύ των δυο σημείων (της ανάντη και της κατάντη πλευράς του μετρητή), γι' αυτό το λόγο το κανάλι εισόδου του εισερχόμενου ρευστού θα φέρει στο άνω μέρος του δυο οπές προκειμένου να λαμβάνεται από τα δυο σημεία μέσω ενός μετρητή διαφορικής πίεσης, η επιθυμητή τιμή της διαφορικής πίεσης. Σύμφωνα με το ISO 5167 για κάθε μετρητή διαφράγματος, πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον σε κάθε πλευρά του (ανάντη και κατάντη) από μια πιεζομετρική οπή. Συναντώνται τρεις διαφορετικές τεχνικές μέτρησης της διαφορικής πίεσης, αυτές παρουσιάζονται μια προς μια στη συνέχεια :



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση πιεζομετρικών οπών για μέτρηση διαφορικής πίεσης με flange Tapping



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση πιεζομετρικών οπών για μέτρηση διαφορικής πίεσης με $D - D/2$ Tapping



Σχήμα 3.8 : Απεικόνιση πιεζομετρικών οπών για μέτρηση διαφορικής πίεσης με Corner Tapping

Στη περίπτωση μας η μέθοδος θα που χρησιμοποιηθεί είναι αυτή των flange tapping. Η απόσταση L της πιεζομετρικής οπής, μετράται μεταξύ του κέντρου της πιεζομετρικής οπής και της ανάντη ή της κατάντη πλευράς του μετρητή. Σύμφωνα με Σχήμα 3.6, η απόσταση L_1 από τη πιεζομετρική οπή έως την ανάντη πλευρά του μετρητή ισούται με $L_1 = 25,4mm = 1''$. Αντίστοιχα από την άλλη πλευρά η απόσταση L_2 αναφέρεται στην απόσταση της δεύτερης πιεζομετρικής οπής με τη κατάντη πλευρά του μετρητή και ισούται και αυτή με $L_2 = 25,4mm = 1''$. Οι παραπάνω αποστάσεις L_1 και L_2 μέσα στα απαιτούμενα όρια τους, που δίνονται στη συνέχεια δε χρειάζεται να αλλαχτεί ο συντελεστής διαστολής, ε:

- $25,4 mm \pm 0,5 mm$, όταν $\beta > 0,6$ και $D_1 < 150 mm$
- $25,4 mm \pm 1,0 mm$, σε κάθε άλλη περίπτωση

Το κέντρο των οπών πρέπει να συναντά το κέντρο της ροής του αγωγού υπο γωνία, όσο το δυνατό πλησιέστερα στις 90° με απόκλιση 3° . Στο σημείο του σπασίματος της οπής με τον αγωγό, η οπή πρέπει να είναι κυλινδρική. Οι άκρες της οπής και τα εσωτερικά της τοιχώματα πρέπει να είναι αιχμηρά και λεία. Για να ελαχιστοποιούνται τυχόν μεταλλικές ακίδες από την επεξεργασία του υλικού ή ανωμαλίες στις άκρες των οπών επιτρέπεται η

καμπυλότητά τους με την ακτίνα τους να είναι μικρότερη από το **1/10** της διαμέτρου της πιεζομετρικής οπής. Επίσης τίποτα δε πρέπει να εμποδίζει τη ροή μέσα στη πιεζομετρική οπή. Η διάμετρος των πιεζομετρικών οπών πρέπει να είναι μικρότερη των $0,13 \cdot D_1$.

3.3.1.4 Αβεβαιότητες στο orifice plate

▼ Αβεβαιότητα όρου C

Για όλες τις πιεζομετρικές οπές κάθε τύπου όταν οι τιμές των b, D_2, Re_{D_2} , και Ra_{D_2} έχουν ληφθεί, υποθέτοντας ότι δεν έχουν κάποιοι σφάλμα, τότε η σχετική αβεβαιότητα της τιμής του συντελεστή ροής C θα ισούται με :

$$\begin{cases} (0,7 - \beta)\% \text{ για } 0,1 \leq \beta \leq 0,2 \\ 0,5\% \text{ για } 0,2 \leq \beta \leq 0,6 \\ (1,667 \cdot \beta - 0,5)\% \text{ για } 0,6 \leq \beta \leq 0,75 \end{cases}$$

Εάν η διάμετρος D_2 του μετρητή είναι $D_2 < 71,12mm$ ή (2,8in), η ακόλουθη σχετική αβεβαιότητα πρέπει να προστεθεί αριθμητικά στις παραπάνω τιμές :

$$+ 0,9 \cdot (0,75 - b) \cdot \left(2,8 - \frac{D_2}{25,4} \right) \% \quad (3.10)$$

Εάν ο λόγος αναλογιών είναι $b > 0,5$ και ο αριθμός $Re_{D_2} < 10000$, η ακόλουθη σχετική αβεβαιότητα, **+ 0,5%**, πρέπει να προστεθεί αριθμητικά στη παραπάνω τιμή, δηλαδή:

$$+ 0,9 \cdot (0,75 - b) \cdot \left(2,8 - \frac{D_2}{25,4} \right) \% + 0,5\% \quad (3.11)$$

▼ Αβεβαιότητα συντελεστή διαστολής, ε

Όταν οι τιμές των $\beta, \frac{\Delta P}{P_1}$ και K έχει ληφθεί υποθέτοντας ότι δεν έχουν κάποιοι σφάλμα, η σχετική αβεβαιότητα της τιμής του συντελεστή διαστολής ε ισούται με :

$$3,5 \cdot \frac{\Delta P}{k \cdot P_1} \% \quad (3.12)$$

όπου: ΔP διαφορική πίεση [Pascals]

P_1 πίεση στην ανάντη πλευρά του μετρητή [Pascals]

k ισεντροπικός εκθέτης

3.3.1.5 Συνάρτηση υπολογισμού συντελεστή ροής, C

Από το ISO 5167 προκύπτει μια εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή ροής του μετρητή, C , ως συνάρτηση του λόγου διαμέτρων β , του αριθμού *Reynolds*, και των μηκών L_1 και L_2 των πιεζομετρικών οπών. Αυτή η εξίσωση δίνεται από το τύπο του Reader-Harris/Gallagher (Reader-Harris M.J., 1998).

$$\begin{aligned}
 C = & 0,5961 + 0,0261 \cdot b^2 - 0,216 \cdot b^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot b}{Re_{D_2}} \right)^{0,7} + \\
 & + (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot b^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{D_2}} \right)^{0,3} \\
 & + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{b^4}{1 - b^4} \\
 & - 0,031 \cdot (M_2 - 0,8M_2^{1,1}) b^{1,3}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\text{όπου : } M_2 = \frac{2L_2}{1-b}, \quad A = \left(\frac{19000b}{Re_{D_2}} \right)^{0,8}$$

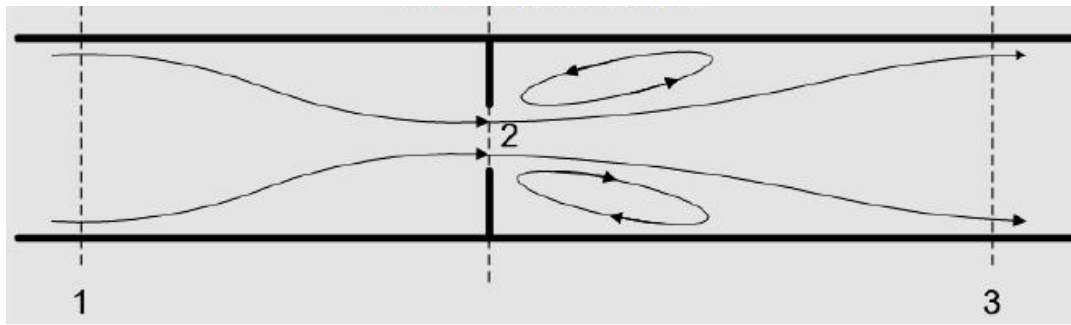
β ο λόγος των διαμέτρων

Re_{D_2} ο αριθμός Reynoldsστη στένωση του μετρητή

L_1, L_2 μήκος πιεζομετρικών οπών

3.3.2 Συντελεστής διαστολής, ε

Καθώς η ροή ταξιδεύει στον αγωγό βρίσκει το μετρητή διαφράγματος που την αναγκάζει να συσταλεί απότομα, και στη συνέχεια η ροή διαστέλλεται τείνοντας να καταλάβει το χώρο του αγωγού. Καθώς η ροή αναπτύσσεται δημιουργούνται στη κατάντη πλευρά του μετρητή ανεπιθύμητοι στροβιλισμοί και η ροή λαμβάνει τυρβώδη χαρακτήρα που διαμορφώνει το προφίλ της ροής στη κατάντη πλευρά του μετρητή αρκετά πολύπλοκο λόγω της συμπίεστικότητας του ρευστού, ώστε ο υπολογισμός του εμβαδού A_2 να είναι αβέβαιος, όπως στο Σχήμα 3.9 . Γι' αυτό το λόγο εισάγεται στην εξίσωσή (3.3) ο συντελεστής διαστολής, ε , της ροής.



Σχήμα 3.9: Εισαγωγή του αέρα (σημείο 1), απότομη στένωση της ροής (σημείο 2), εξέλιξη της ροής με τη δημιουργία στροβίλων μέχρι την ανάπτυξη της (σημείο 3)

Για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης της διαφορικής πίεσης, χρησιμοποιείται ένας εμπειρικός τύπος από τους Reader-Harris/Gallagher για να υπολογιστεί ο συντελεστής ,ε(Reader-Harris M.J., 1998).

$$e = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k} \right] \quad (3.14)$$

όπου : β ο λόγος αναλογίας των διαμέτρων
 P_1 η πίεση στην ανάντη πλευρά
 P_2 η πίεση στην κατάντη πλευρά
 κ ισεντροπικός εκθέτης

Ο παραπάνω τύπος χρησιμοποιείται για αέρια, ατμούς και φυσικό αέριο. Επίσης, η παραπάνω εξίσωση είναι κατάλληλη μόνο για $P_2/P_1 \geq 0,75$. Οι τιμές του συντελεστή επέκτασης ,ε, σαν συνάρτηση του ισεντροπικού εκθέτη ,κ, της πιεζομετρικής αναλογίας P_2/P_1 , και την αναλογία διαμέτρων , β, παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα 3.5:

Πίνακας 3.5: Συντελεστής επέκτασης, ϵ (ISO 5167-2:2003).

Diameter Ratio		Expansibility factor, ϵ , for P_2/P_1 equal to							
β	β^4	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75
for $\kappa = 1,2$									
0,1000	0,0001	0,9941	0,9883	0,9824	0,9764	0,9705	0,9555	0,9404	0,9252
0,5623	0,1000	0,9936	0,9871	0,9806	0,9741	0,9676	0,9511	0,9345	0,9177
0,6687	0,2000	0,9927	0,9853	0,9779	0,9705	0,9631	0,9443	0,9254	0,9063
0,7401	0,3000	0,9915	0,9829	0,9743	0,9657	0,9570	0,9352	0,9132	0,8910
0,7500	0,3164	0,9912	0,9824	0,9736	0,9648	0,9559	0,9335	0,9109	0,8881
for $\kappa = 1,3$									
0,1000	0,0001	0,9946	0,9891	0,9837	0,9782	0,9727	0,9587	0,9446	0,9303
0,5623	0,1000	0,9940	0,9881	0,9821	0,9760	0,9700	0,9547	0,9391	0,9234
0,6687	0,2000	0,9932	0,9864	0,9796	0,9729	0,9658	0,9484	0,9307	0,9128
0,7401	0,3000	0,9921	0,9842	0,9762	0,9682	0,9602	0,9399	0,9193	0,8985
0,7500	0,3164	0,9919	0,9838	0,9756	0,9674	0,9591	0,9383	0,9172	0,8959
for $\kappa = 1,4$									
0,1000	0,0001	0,9950	0,9899	0,9848	0,9797	0,9646	0,9615	0,9483	0,9348
0,5623	0,1000	0,9945	0,9889	0,9833	0,9777	0,9720	0,9577	0,9431	0,9283
0,6687	0,2000	0,9937	0,9874	0,9810	0,9746	0,9681	0,9518	0,9353	0,9184
0,7401	0,3000	0,9927	0,9853	0,9779	0,9704	0,9629	0,9439	0,9246	0,9050
0,7500	0,3164	0,9925	0,9849	0,9773	0,9696	0,9619	0,9424	0,9226	0,9025
for $\kappa = 1,66$									
0,1000	0,0001	0,9958	0,9915	0,9872	0,9828	0,9784	0,9673	0,9558	0,9441
0,5623	0,1000	0,9953	0,9906	0,9859	0,9811	0,9763	0,9640	0,9515	0,9386
0,6687	0,2000	0,9947	0,9893	0,9839	0,9785	0,9730	0,9590	0,9447	0,9301
0,7401	0,3000	0,9938	0,9876	0,9813	0,9749	0,9685	0,9523	0,9357	0,9186
0,7500	0,3164	0,9936	0,9872	0,9808	0,9743	0,9677	0,9510	0,9340	0,9164

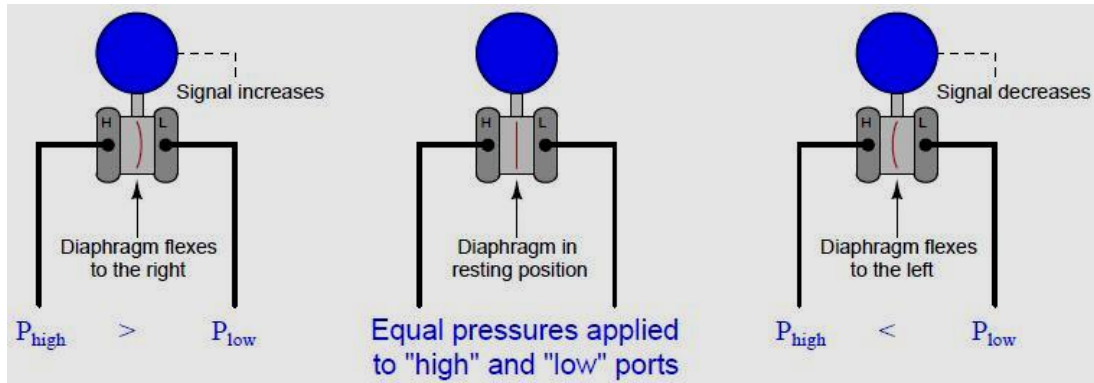
3.3.3 Μετρητής διαφορικής πίεσης, ΔΡ

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για τον υπολογισμό της παροχής του ρευστού είναι η χρήση ενός μετρητή διαφορικής πίεσης (Differential Pressure Transmitter), σχήμα. Αυτή η συσκευή μετρά τη διαφορά πίεσης μεταξύ δυο σημείων και εξάγει ένα ηλεκτρικό σήμα το ποίο αντιπροσωπεύει αυτή τη πίεση σε μια βαθμονομημένη κλίμακα. Η τιμή εξόδου ενός μετατροπέα πίεσης είναι σε τάση [Volts], και το σήμα εξόδου είναι της κλίμακας των [mV]. Αυτό το μικρό σήμα για να μπορεί να είναι σε κατάλληλη μορφή για να χρησιμοποιηθεί, απαιτείται αρκετές προσαρμογές (signal conditioning) που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Επιπλέον πολλοί μετατροπείς πίεσης εξάγουν ένα προσαρμοσμένο σήμα των 0-5 [V] ή των 4-20 [mA]. Οι δύο τιμές εξόδου είναι γραμμικές ως προς το εύρος λειτουργίας του μετατροπέα. Για παράδειγμα, και οι δυο τιμές των 0 V και 4 mA αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν μια μηδενική τιμή μέτρησης. Όμοια οι τιμές των 5 Volts και των 20 mA αντιπροσωπεύουν τη χωρητικότητα της πλήρους κλίμακας (Full Scale capacity), δηλαδή τη μέγιστη τιμή πίεσης που μπορεί να μετρήσει ο μετρητής. Τα σήματα των 0-5 V ή των 4-20 mA μπορούν εύκολα να μετρηθούν με τις πολυλειτουργικές κάρτες καταγραφής δεδομένων (multi-function Data Acquisition Convertors ή DAC). Στη συνέχεια ακολουθεί μια εικόνα ενός μετρητή διαφορικής πίεσης που είναι για βιομηχανική χρήση.



Εικόνα 3.2: Μετρητής διαφορικής πίεσης βιομηχανικής λειτουργίας (<http://www.tradekorea.com>).

Ανεξάρτητα από το μοντέλο, κάθε μετρητής διαφορικής πίεσης έχει δυο υποδοχές μέτρησης πίεσης ώστε να πραγματοποιείται η εκτίμηση της διαφορικής πίεσης της ροής. Αυτές οι υποδοχές τυπικά αποτελούνται από θηλυκά στόμια NTP διάστασης $\frac{1}{4}$ τα οποία δέχονται τις απαραίτητες συνδέσεις. Το πιο κοινό αισθητήριο που χρησιμοποιείται στα σύγχρονα transmitters διαφορικής πίεσης είναι το διάφραγμα, Σχήμα 3.10. Από τη μια πλευρά, υποδοχή High, το διάφραγμα λαμβάνει τη πίεση του ρευστού από την ανάντη πλευρά του μετρητή, ενώ από την υποδοχή "Low" το διάφραγμα λαμβάνει τη πίεση του ρευστού από την κατάντη πλευρά του μετρητή. Κάθε διαφορά της πίεσης μεταξύ των δυο υποδοχών προκαλεί στο διάφραγμα τη μετακίνησή του από την αρχική του θέση. Έπειτα αυτή η μετακίνηση του διαφράγματος μεταφράζεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα, ανάλογα βέβαια από το κατασκευαστή και το μοντέλο του.



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση διαφράγματος σε μετρητή διαφορικής πίεσης

Η φόρμουλα μετατροπής, του ηλεκτρικού σήματος του μετρητή σε τιμή πίεσης, που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον τύπο του αισθητήριου, η οποία βέβαια παρέχεται από το κατασκευαστή του. Μια φόρμουλα μετατροπής είναι συνάρτηση της τάσης διέγερσης, της χωρητικότητας πλήρους κλίμακας του αισθητήρα, και τον συντελεστή βαθμονόμησης :

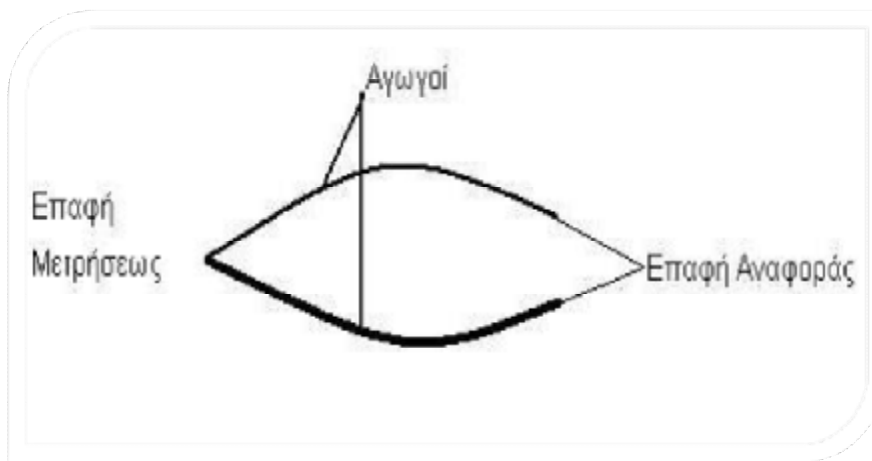
$$Pressure = \left(\frac{CF}{V_{ex}} \right) \cdot \left(\frac{V_{meas}}{CF} \right) \quad (3.15)$$

όπου :	C_{fs} :	Full Scale capacity –	Η μέγιστη πίεση που μπορεί να λάβει ο αισθητήρας
	V_{ex} :	Τάση Διέγερσης –	Η προτεινόμενη τάση εισόδου
	V_{meas} :	Μετρούμενη τάση	
	CF :	Συντελεστής Βαθμονόμησης –	Η έξοδος του αισθητήρα, συνήθως εκφρασμένη σε mV ανά V εισόδου

3.3.4 Μέτρηση θερμοκρασίας

Στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη έχει επιλεγεί να εγκατασταθούν μετρητές θερμοκρασίας τύπου θερμοζεύγους ώστε να επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του ιξώδους και της πυκνότητας του ρευστού μέσω της θερμοκρασιακής τιμής.

Πρόκειται για το συνδυασμό δυο αγωγών από διαφορετικό υλικό, το οποίο μπορεί να είναι μέταλλο, ημιαγωγός ή αμέταλλο, ενωμένα ο ένας με τον άλλο στο ένα τους άκρο. Τα σημείο της ένωσης ονομάζεται επαφή μέτρησης, ενώ τα ελεύθερα άκρα αποτελούν την επαφή αναφοράς. Η επαφή αναφοράς ονομάζεται συχνά και ψυχρή επαφή. Η ονομασία αυτή δεν είναι απόλυτα σωστή, γιατί υπονοεί ότι το θερμοζεύγος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν η θερμοκρασία της επαφής μέτρησης είναι μεγαλύτερη από την επαφή αναφοράς, ενώ κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η μόνη απαίτηση είναι να υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.11: Σχηματική άποψη θερμοζεύγους

Η αρχή λειτουργίας των θερμοζευγών στηρίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο Seebeck, το οποίο παρατηρείται όταν δυο αγωγοί από διαφορετικά μέταλλα ενωθούν στις άκρες τους σχηματίζοντας κλειστό κύκλωμα, αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, εφ' όσον οι δυο επαφές βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, θα πρέπει οι επαφές μέτρησης και αναφοράς να βρίσκονται η κάθε μια σε ισόθερμο περιβάλλον, διαφορετικής θερμοκρασίας. Η εμφανιζόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) μεταξύ των ακροδεκτών της επαφής αναφοράς ονομάζεται τάση Seebeck. Η τάση Seebeck αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο επαφών.

Μια απλούστερη ερμηνεία του φαινομένου Seebeck μπορεί να δοθεί ως ένας μεταλλικός αγωγός ο οποίος αποτελείται από ένα πλέγμα ακίνητων θετικών ιόντων. Τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα και κινούνται μέσα στο πλέγμα σαν να ήταν ένα αέριο. Αν όλος ο αγωγός βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία και δεν διαρρέεται από ρεύμα, τότε το ηλεκτρικό φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του αγωγού, παρά το γεγονός ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτελούν άτακτη θερμική κίνηση. Αν προκληθεί κάποια θερμοκρασιακή βαθμίδα, τότε κάποια ηλεκτρόνια θα κινηθούν περισσότερο, προκαλώντας έτσι μια ανισοκατανομή του φορτίου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού. Παρατηρούμε ότι η τάση Seebeck οφείλει την ύπαρξή της στην θερμοκρασιακή βαθμίδα, η οποία είναι μια ιδιότητα του μεταλλικού αγωγού και δεν εξαρτάται από την επαφή

ή την ύπαρξη και δεύτερου αγωγού από διαφορετικό υλικό. Η βασική διαφορά του θερμοζεύγους από τους άλλους αισθητήρες θερμοκρασίας, είναι ότι το σήμα εξόδου του δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αλλά από τη θερμοκρασιακή βαθμίδα κατά μήκος του. Αν θεωρήσουμε έναν αγωγό μικρού μήκους, η μεταβολή της τάσης Seebeck dE , κατά μήκος αυτού, είναι ανάλογη του συντελεστή Seebeck του αγωγού, $s(T)$, και της θερμοβαθμίδας, dT , κατά μήκος του :

$$dE = s(T, x) \cdot \frac{dT}{dx} dx \quad (3.16)$$

Ο συντελεστής Seebeck εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη θέση κατά μήκος του αγωγού, ο οποίος γενικά δεν είναι απολύτως ομογενής και ομοιόμορφος. Το γεγονός ότι ο υπολογισμός της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) E ενός θερμοζεύγους σε ένα κύκλωμα, απαιτεί την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης (3.16), η οποία μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση του θερμοζεύγους στη θερμομετρία, κάθε άλλο παρά πρακτική είναι. Αυτό γιατί η εφαρμογή της εξίσωσης, απαιτεί λεπτομερή γνώση της θερμοβαθμίδας κατά μήκος των αγωγών, καθώς και της λεπτομερούς κατασκευής του αγωγού, όπως επίσης και των στοιχείων που αποτελούν το βολτόμετρο με το οποίο η E θα μετρηθεί. Το πρόβλημα αυτό υπερβαίνεται με τη βοήθεια δυο θεωρημάτων, τα οποία βασίζονται στην έννοια του ισόθερμου περιβάλλοντος, και των ομογενών αγωγών :

1. Το πρώτο θεώρημα αναφέρει ότι αν δεν υπάρχει θερμοβαθμίδα (δηλαδή $\frac{dT}{dx} = 0$) τότε δεν αναπτύσσεται τάση Seebeck, ενώ
2. Το δεύτερο αναφέρει ότι αν ο αγωγός είναι ομογενής (δηλαδή $s(T, x) = s(T)$), τότε η τάση Seebeck εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία των άκρων του.

3.3.4.1 Στατικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Τα στατικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων αναφέρονται στην κατάσταση κατά την οποία έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ αισθητήρα και μετρούμενου μεγέθους (Αθανασίου Α., 2004). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει το μετρούμενο μέγεθος είτε να είναι σταθερό, είτε να μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με τη δυνατότητα του αισθητήρα να αντιληφθεί τη μεταβολή αυτή.

- **Πιστότητα**

Με τον όρο πιστότητα αποδίδεται ο αγγλικός όρος accuracy. Η πιστότητα δε σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων με τον οποίο μπορεί να γίνει η μέτρηση, αλλά με το κατά πόσο το αποτέλεσμα που δίνει ο αισθητήρας πλησιάζει την φυσική πραγματικότητα, μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών (Nicholas J.V., 1998). Η πιστότητα δίνεται συνήθως ως ποσοστό επί του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα.

- **Ακρίβεια, Επαναληψιμότητα, Αναπαραγωγιμότητα**

Ο όρος ακρίβεια (precision) εκφράζει τον βαθμό ελευθερίας του αισθητήρα από τυχαία σφάλματα. Αν πάρουμε μεγάλο αριθμό μετρήσεων από ένα ακριβή αισθητήρα, τότε η μεταξύ τους διασπορά θα είναι μικρή. Η ακρίβεια συγχέεται συχνά με την πιστότητα. Η μεγάλη ακρίβεια δεν σημαίνει κατ' ανάγκη και μεγάλη πιστότητα. Ένας ακριβής αισθητήρας μπορεί να έχει κακή πιστότητα. Κακής πιστότητας μετρήσεις από ένα ακριβή αισθητήρα, σημαίνει ότι οι μετρήσεις έχουν συστηματικό σφάλμα (bias), γεγονός το οποίο μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση (διακρίβωση) του αισθητήρα. Οι όροι επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα είναι ταυτόσημοι, χρησιμοποιούνται όμως ο καθένας σε διαφορετικές περιπτώσεις. Και οι δύο αναφέρονται στο πόσο κοντά είναι τα αποτελέσματα ενός αισθητήρα που μετρά το ίδιο σταθερό μέγεθος, η μεν επαναληψιμότητα όταν οι συνθήκες μέτρησης είναι σταθερές, η δε αναπαραγωγιμότητα όταν οι συνθήκες μέτρησης μεταβάλλονται.

- **Εύρος**

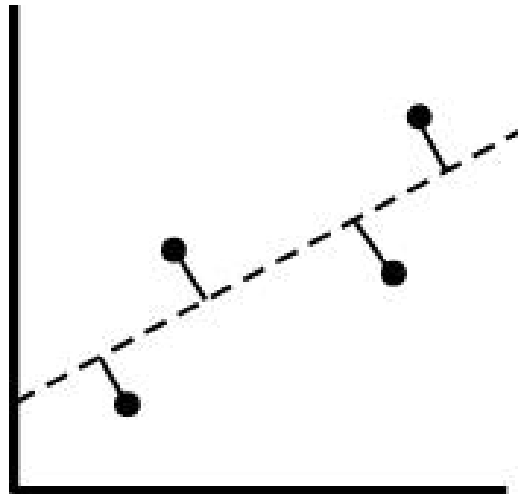
Με τον όρο εύρος αναφερόμαστε στην ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει ένας αισθητήρας.

- **Συστηματικό σφάλμα**

Ως συστηματικό σφάλμα (bias) είναι ένα σταθερό σφάλμα. το ίδιο για όλο το εύρος του αισθητήρα, το οποίο συνήθως μπορεί να μηδενιστεί μέσω βαθμονόμησης.

- **Γραμμική απόκριση**

Είναι γενικά επιθυμητό η απόκριση ενός αισθητήρα να μεταβάλλεται γραμμικά με το μετρούμενο μέγεθος. Τα σημεία του Σχήματος 3.12, απεικονίζουν την σχέση μεταξύ σήματος εισόδου (οριζόντιος άξονας) ενός αισθητήρα. Η γραμμή μεταξύ των σημείων χαράσσεται εφαρμόζοντας την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η μη γραμμικότητα εκφράζεται ως η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των σημείων και της γραμμής. Η μη γραμμικότητα εκφράζεται συνήθως ως η απόκλιση του εύρους του αισθητήρα.



Σχήμα 3.12: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα

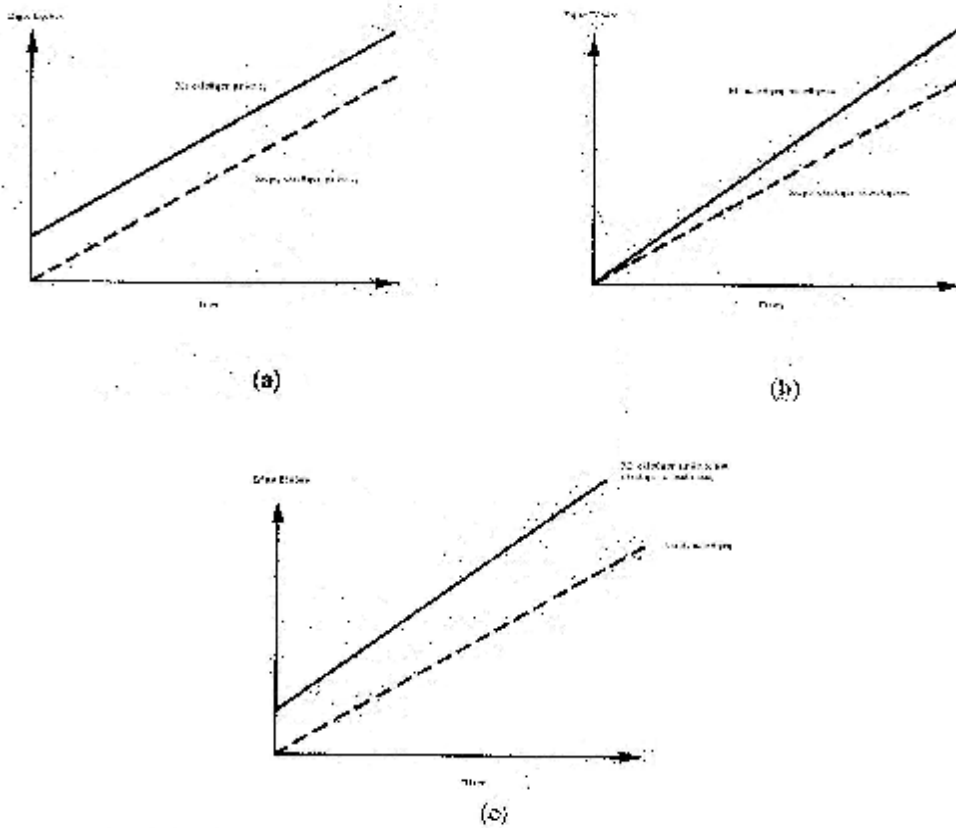
- **Ευαισθησία στη μέτρηση**

Πρόκειται για το λόγο της μεταβολής στην ένδειξη του αισθητήρα, προς τη μεταβολή το φυσικού μεγέθους που την προκάλεσε. Από τον ορισμό αυτό προκύπτει ότι η ευαισθησία ισούται με την εφαπτομένη της γραφικής παράστασης του Σχήματος 3.12.

- **Ευαισθησία στη διαταραχή**

Η βαθμονόμηση και τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα ισχύουν όταν αυτό λειτουργεί εντός συγκεκριμένου εύρους περιβαλλοντικών συνθηκών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία κλπ. Το εύρος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του αισθητήρα. Μεταβολή κάποιας από τις παραμέτρους αυτές ενδέχεται να μεταβάλλει κάποιο από τα στατικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή ορίζεται ως η ευαισθησία στη διαταραχή. Τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που μεταβάλλονται είναι κυρίως δυο και είναι γνωστά ως ολίσθηση του μηδενός (zerodrift) και ολίσθηση ευαισθησίας (sensitivitydrift). Η ολίσθηση του μηδενός είναι το μη μηδενικό σήμα εξόδου του αισθητήρα όταν το σήμα εισόδου είναι μηδέν, λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Μετράται συνήθως σε $V^{\circ}C^{-1}$ στην περίπτωση π.χ ενός βολτόμετρου το οποίο έχει επηρεαστεί από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Αν ένας αισθητήρας επηρεάζεται από περισσότερες από μια περιβαλλοντικές παραμέτρους, τότε αυτός χαρακτηρίζεται από αντίστοιχες σε αριθμό ολισθήσεις του μηδενός, μια για κάθε επηρεάζουσα παράμετρο του αισθητήρα. Χαρακτηριστική ολίσθηση μηδενός αισθητήρα πίεσης, φαίνεται στο Σχήμα 3.13α.

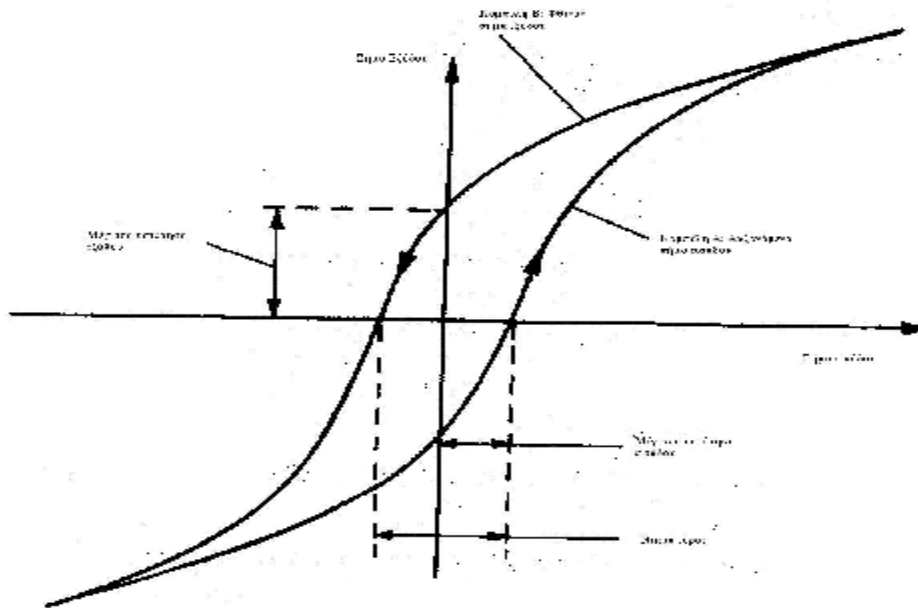
Η ολίσθηση ευαισθησίας ορίζεται ως το ποσό μεταβολής της ευαισθησίας ενός αισθητήρα λόγω μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών. Εκφράζεται μέσω συντελεστών ολίσθησης ευαισθησίας, οι οποίοι εκφράζουν το μέγεθος της ολίσθησης ανά μονάδα μεταβολής της περιβαλλοντικής παραμέτρου που την προκάλεσε. Το Σχήμα 3.13b δείχνει την επίδραση της ολίσθησης ευαισθησίας στα χαρακτηριστικά εξόδου ενός αισθητήρα. Η συνδυασμένη επίδραση των ολισθήσεων μηδενός και ευαισθησίας στα χαρακτηριστικά εξόδου ενός αισθητήρα, φαίνεται στο Σχήμα 3.13c.



Σχήμα 3.13: a) Ολίσθηση μηδενός, b) Ολίσθηση ευαισθησίας, c) Συνδυασμένη επίδραση των δυο ολισθήσεων (Morris A.S., 1993).

- Υστέρηση

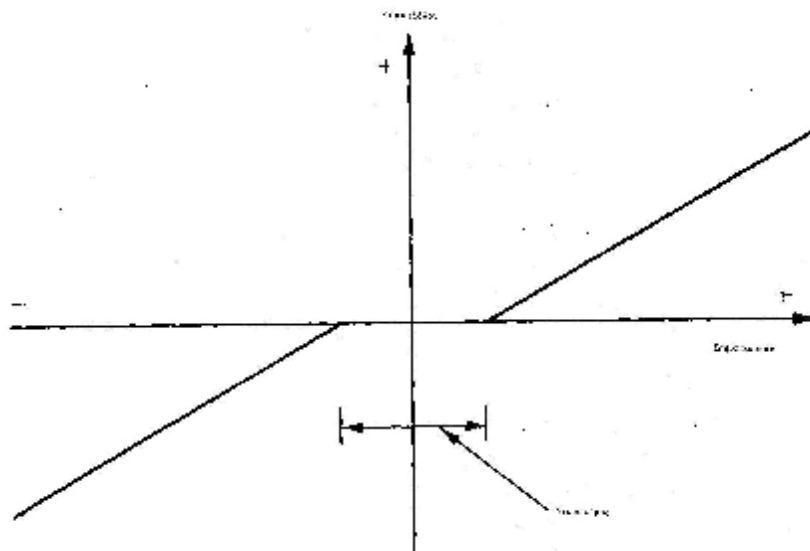
Στο *Σχήμα 3.14*, φαίνεται το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα ο οποίος παρουσιάζει υστέρηση. Αν η τιμή του σήματος εισόδου μεταβάλλεται σταθερά, ξεκινώντας από αρνητικές, το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη A. Αν κατόπιν το σήμα εξόδου μειώνεται σταδιακά, τότε το σήμα εξόδου περιγράφεται από την καμπύλη B. Η μη ταύτιση των δυο καμπυλών <<φορτίσεως – εκφορτίσεως>> είναι γνωστή ως υστέρηση. Η υστέρηση εκφράζεται μέσω της μέγιστης υστέρησης εισόδου και της μέγιστης υστέρησης εξόδου, οι οποίες ορίζονται στο *Σχήμα 3.14*.



Σχήμα 3.14: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με υστέρηση (Morris A.S., 1993).

- *Νεκρό εύρος*

Ως νεκρό εύρος (dead space) ορίζεται το εύρος του σήματος εισόδου, για το οποίο το σήμα εξόδου είναι μηδενικό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15. Όπως βλέπουμε και στο Σχήμα, κάθε αισθητήρας ο οποίος εμφανίζει υστέρηση, εμφανίζει και νεκρό εύρος. Παρ' όλα αυτά ακόμη και αισθητήρες οι οποίοι δεν εμφανίζουν σημαντική υστέρηση, μπορεί να εμφανίζουν νεκρό εύρος.



Σχήμα 3.15: Χαρακτηριστικά εξόδου αισθητήρα με νεκρό εύρος (Morris A.S., 1993).

• Διακριτική ικανότητα

Ως διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα ορίζεται η απαιτούμενη ελάχιστη μεταβολή του σήματος εισόδου, ώστε να προκληθεί μεταβολή στο σήμα εξόδου του αισθητήρα.

3.3.4.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά

Εκτός από τα στατικά χαρακτηριστικά τα οποία αναφέρονται στην περίπτωση όπου έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ σήματος εισόδου και αισθητήρα (δηλαδή όταν πλέον τα σήματα εισόδου-εξόδου δεν μεταβάλλονται με το χρόνο), κάθε αισθητήρας διαθέτει και δυναμικά χαρακτηριστικά (Αργυρίου Α., 2004). Τα δυναμικά χαρακτηριστικά περιγράφουν τη συμπεριφορά του αισθητήρα μεταξύ της στιγμής κατά την οποία το σήμα εισόδου μεταβάλλεται έως τη στιγμή κατά την οποία το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί εκ νέου. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ισχύουν, όπως και τα στατικά, εντός συγκεκριμένου εύρους συνθηκών λειτουργίας του αισθητήρα. Αν ο αισθητήρας βρεθεί να λειτουργεί εκτός αυτού του εύρους, τότε τα δυναμικά χαρακτηριστικά αναμένεται να μεταβληθούν.

Υποθέτοντας ένα γραμμικό αισθητήρα του οποίου οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, η σχέση μεταξύ σήματος εισόδου-εξόδου περιγράφεται από την εξίσωση :

$$a_n \frac{d_n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \mathbf{K} + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_m \frac{d_m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d_{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \mathbf{K} + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_i \quad (3.17)$$

όπου : q_i και q_o το σήμα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα,
 $a_0 \mathbf{K} a_n$ και $b_0 \mathbf{K} b_n$ σταθερές

Αν περιοριστούμε στην περίπτωση κατά την οποία το σήμα εξόδου είναι κλιμακωτή συνάρτηση ή αλλιώς συνάρτηση Heaviside, που ισχύει ότι :

$$f(x) = H(x - a) \quad (3.18)$$

όπου :

$$H(x - a) = \begin{cases} 0, & x < a \\ 1/2, & x = a \\ 1, & x > a \end{cases}$$

Η τιμή της συνάρτησης κάνει άλμα από την τιμή 0 στην τιμή 1 για $x = a$. Τότε η εξίσωση (2.17) λαμβάνει την ακόλουθη απλούστερη μορφή :

$$a_n \frac{d_n q_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d_{n-1} q_o}{dt^{n-1}} + \mathbf{K} + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \quad (3.19)$$

▼ Αισθητήρας Μηδενικής Τάξεως

Αισθητήρας μηδενικής τάξεως είναι εκείνος του οποίου οι συντελεστές $a_1 \mathbf{K} a_n$ είναι μηδέν και μόνο ο συντελεστής a_0 είναι διάφορος του μηδενός. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (3.19) γράφεται :

$$a_0 q_0 = b_0 q_i \Rightarrow q_0 = \frac{b_0}{a_0} q_i = k \cdot q_i \quad (3.20)$$

όπου: k σταθερά, γνωστή και ως ευαισθησία του αισθητήρα

▼ Αισθητήρας Πρώτης Τάξεως

Πρόκειται για τον αισθητήρα, η συμπεριφορά του οποίου περιγράφεται από εξίσωση της μορφής :

$$a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \quad (3.21)$$

Ορίζοντας τον συντελεστή $D = \frac{d}{dt}$, η σχέση (3.21) γράφεται ως :

$$a_1 D q_0 + a_0 q_0 = b_0 q_i \quad (3.22)$$

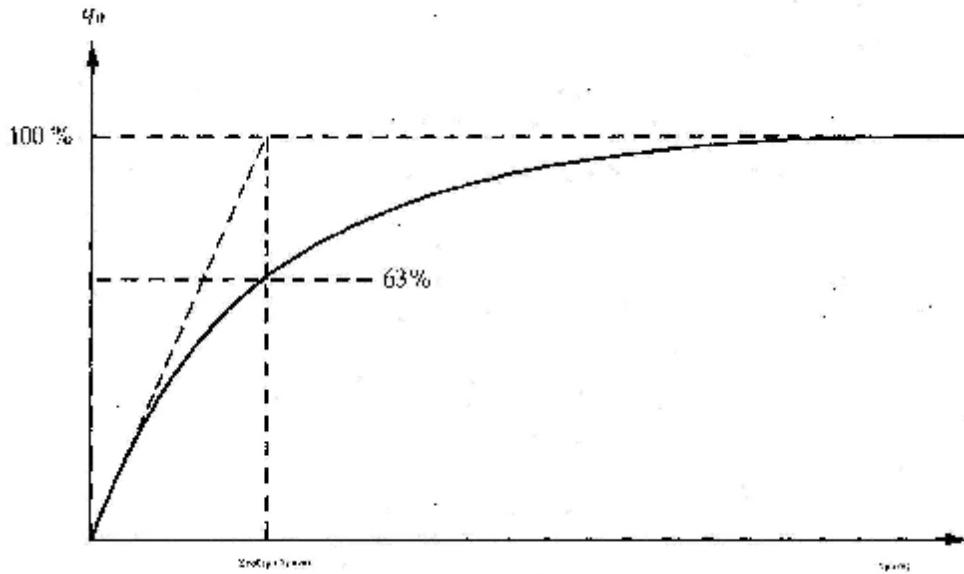
από την οποία προκύπτει :

$$q_0 = \frac{\frac{b_0}{a_0} \cdot q_i}{1 + \frac{a_1}{a_0} \cdot D} \quad (3.23)$$

Αν ορίσουμε ως $k = \frac{b_0}{a_0}$ τη στατική ευαισθησία και $t = \frac{a_1}{a_0}$ τη σταθερά χρόνου του αισθητήρα , εξίσωση (3.23) γράφεται ως :

$$q_0 = \frac{k \cdot q_i}{1 + t \cdot D} \quad (3.24)$$

Η αναλυτική λύση της εξίσωσης (3.24) φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.16. Η σταθερά χρόνου t της απόκρισης του αισθητήρα στην κλιμακωτή μεταβολή του σήματος εισόδου, είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το σήμα εξόδου να γίνει ίσο με το 63% της τελικής τιμής του. Παράδειγμα αισθητήρα πρώτης τάξεως είναι το θερμοζεύγος.



Σχήμα 3.16: Χαρακτηριστικά αισθητήρα πρώτης τάξεως (Morris A.S., 1993)

▼ Αισθητήρας Δευτέρας Τάξεως

Πρόκειται για τον αισθητήρα η συμπεριφορά του οποίου περιγράφεται από εξίσωση της μορφής :

$$a_2 \frac{d^2 q_o}{dt^2} + a_1 \frac{dq_o}{dt} + a_0 q_o = b_0 q_i \tag{3.25}$$

Χρησιμοποιώντας ξανά το συμβολισμό του τελεστή D , η σχέση (3.25) γίνεται :

$$a_2 D^2 q_0 + a_1 D q_0 + a_0 q_0 = b_0 q_i \tag{3.26}$$

από την οποία καταλήγουμε στην

$$\frac{b_0 q_i}{a_0 + a_1 D + a_2 D^2} \Rightarrow \frac{q_0}{q_i} = \frac{k}{\frac{D^2}{w^2} + \frac{2eD}{w} + 1} \tag{3.27}$$

Η εξίσωση (3.27) αποτελεί την τυπική εξίσωση αισθητήρα δευτέρας τάξεως. Οι όροι στατικής ευαισθησίας k , μη αποσβεσθείσες φυσικής συχνότητας ω και λόγος απόσβεσης ε ορίζονται ως εξής :

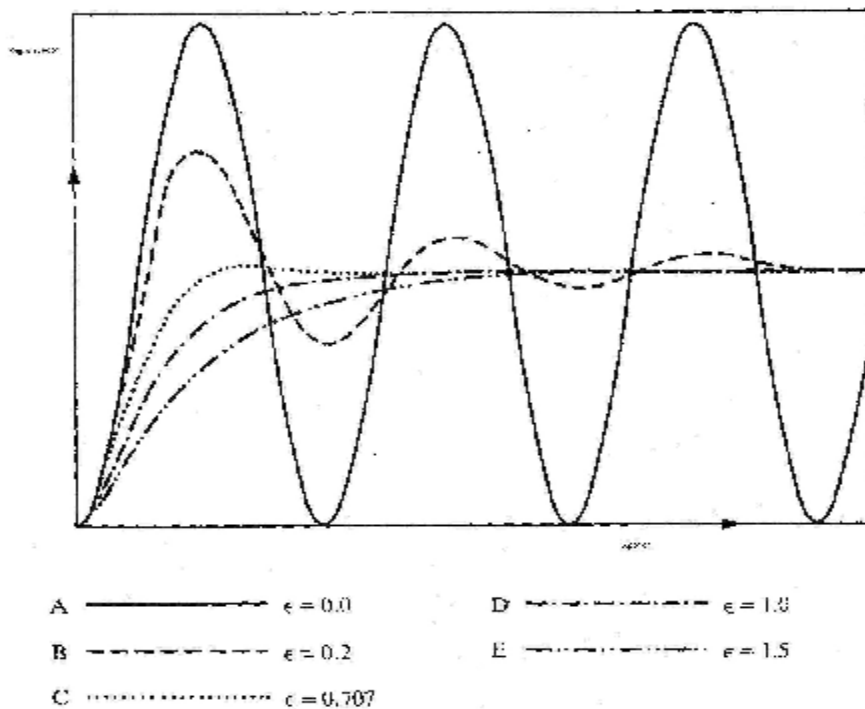
$$k = \frac{b_0}{a_0}$$

$$\omega = \frac{a_0}{a_2}$$

$$e = \frac{a_1}{2a_0a_2}$$

Η μορφή του σήματος εξόδου του αισθητήρα, το οποίο θα προκύψει ως η αναλυτική λύση της (3.27), εξαρτάται από την τιμή του λόγου απόσβεσης ε , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17.

Στη πρώτη περίπτωση όπου δεν υπάρχει απόσβεση ($\varepsilon=0$) το σήμα εξόδου είναι περιοδικό, αποκρινόμενο στη μεταβολή του σήματος εισόδου. Για $\varepsilon=0,2$ το σήμα εξόδου εξακολουθεί να είναι περιοδικό αλλά οι ταλαντώσεις σταδιακά μηδενίζονται. Περαιτέρω αύξηση του ε προκαλεί πλήρη εξαφάνιση των ταλαντώσεων. Γενικά οι αισθητήρες θα πρέπει να επιλέγονται έτσι το ε να κυμαίνεται μεταξύ 0,6 – 0,8.



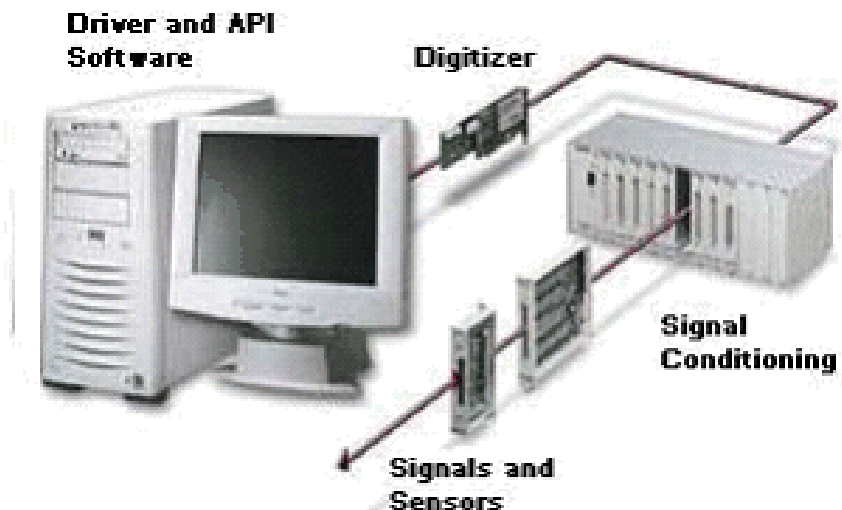
Εικόνα 3.17: Απόκριση αισθητήρα δευτέρας τάξεως (Morris A.S., 1993).

3.3.5 Συστήματα καταγραφής δεδομένων

Με τον όρο απόκτηση (Acquisition) περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο μεγέθη όπως η πίεση, η θερμοκρασία, το ρεύμα μετατρέπονται σε ψηφιακά δεδομένα και απεικονίζονται στην οθόνη ενός υπολογιστή. Ως συστήματα DAQ (DataAcquisition) θεωρούνται οι σύγχρονες συσκευές μέτρησης, όπως οι διάφορες κάρτες DAQ, που συνδέονται στον δίαυλο PCI, τα όργανα που είναι εφοδιασμένα με πρωτόκολλο RS-232 ή GPIB καθώς και τα βιομηχανικά συστήματα μετρήσεων τύπου PXI και VXI. Όλα αυτά σχεδιάζονται σύμφωνα με την αρχιτεκτονική της απόκτησης, της ανάλυσης και της επεξεργασίας των σημάτων μετρήσεων που λαμβάνονται στην είσοδο.

3.3.5.1 Συσκευές DAQ εργαστηριακών εφαρμογών

Οι συσκευές DAQ εργαστηριακών εφαρμογών είναι κάρτες που συνδέονται με τον υπολογιστή για την απόκτηση δεδομένων. Οι συσκευές DAQ μπορούν είτε να συνδεθούν στο εσωτερικό του υπολογιστή μέσω ενός συνδέσμου είτε εξωτερικά με τον υπολογιστή μέσω τερματικών συνδέσμων, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μέσω της παράλληλης ή της σειριακής θύρας. Ο ρόλος των συσκευών DAQ είναι η μετατροπή του εισερχόμενου σήματος σε ψηφιακό δεδομένο που στέλνεται στον υπολογιστή και όχι η επεξεργασία της μέτρησης, την οποία αναλαμβάνει το λογισμικό. Προτού όμως ο υπολογιστής μετρήσει αυτό το φυσικό σήμα θα πρέπει ένας αισθητήρας να το μετατρέψει σε ηλεκτρικό μέγεθος όπως τάση ή ρεύμα. Η περιγραφόμενη διαδικασία παρουσιάζεται στο ακόλουθο *Σχήμα 3.18* :



Σχήμα 3.18 : Γενικό σύστημα DAQ

Χρησιμοποιώντας τις κάρτες DAQ υψηλής απόδοσης και γρήγορους υπολογιστές μαζί με λογισμικό μετρήσεων, όπως το LabView, μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια

μέτρησης και έλεγχο της πληροφορίας του σήματος σε μια εργαστηριακή ή βιομηχανική εφαρμογή. Για τη σωστή λειτουργία του, ένα σύστημα DAQ θα πρέπει να αποτελείται από κάποια στοιχεία. Ένα από αυτά τα στοιχεία είναι ο υπολογιστής, ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τις ταχύτητες με τις οποίες μπορούμε να αποκτήσουμε δεδομένα. Η συλλογή δεδομένων γίνεται με μεγάλες ταχύτητες στα σημερινά συστήματα, με τη βοήθεια γρήγορων επεξεργαστών και διαύλων υψηλής απόδοσης. Συγκεκριμένα ο δίαυλος PCI και η θύρα USB είναι οι δημοφιλέστεροι και οι επικρατέστεροι δίαυλοι των σημερινών επιτραπέζιων υπολογιστών.



Εικόνα 3.3.α: Κάρτα DAQ που τοποθετείται στον δίαυλο PCI (<http://www.ni.com>)



Εικόνα 3.3.β: Κάρτα DAQ που τοποθετείται στη θύρα USB (<http://www.ni.com>)

Η επιλογή μιας συσκευής DAQ και μιας αρχιτεκτονικής διαύλων θα πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και τις μεθόδους μεταφοράς δεδομένων που υποστηρίζονται από τη συσκευή και από το δίαυλο προς επιλογή. Διαφορετικά μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά η απόδοση του συστήματος DAQ. Για την απόκτηση δεδομένων υπάρχουν κάποιοι περιοριστικοί παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι ο σκληρός δίσκος, ο οποίος μειώνει σημαντικά το χρόνο απόκτησης και κατανομής δεδομένων σε αυτόν.

Ο αισθητήρας είναι το επόμενο στοιχείο από το οποίο θα πρέπει να αποτελείται ένα σύστημα DAQ. Ο αισθητήρας ορίζεται ως το βασικό στοιχείο σε μια μετρητική αλυσίδα, που μετατρέπει τη μεταβολή εισόδου σε μετρήσιμο σήμα. Το σήμα εισόδου του αισθητήρα μπορεί να είναι κάθε μορφής, ενώ το σήμα εξόδου έχει αποκλειστικά ηλεκτρικές ιδιότητες αναλογικής ή ψηφιακής μορφής. Η θέση ενός αισθητήρα μπορεί να είναι εξωτερική ούτως ώστε να δέχεται τα εξωτερικά ερεθίσματα όπως επίσης και εσωτερική παρακολουθώντας τη συμπεριφορά του συστήματος.

Τέλος τα ηλεκτρικά σήματα των αισθητήρων οδηγούνται σε ένα πολυπλέκτη, όπου σκοπός του είναι να συνδέει τους αισθητήρες με τον μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D) ή απευθείας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή στη περίπτωση που οι αποκρίσεις των αισθητηρίων είναι σε ψηφιακή μορφή.

3.3.5.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά καρτών

Οι κάρτες DAQ είναι πολυλειτουργικές κάρτες αναλογικών και ψηφιακών εισόδων/εξόδων που διαθέτουν ενσωματωμένους μετρητές, ξεκινούν από ένα 12 bit και άνω μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού σήματος (A/D) ή ψηφιακού σε αναλογικού (D/A) σήματος με είσοδο 8 ή άνω καναλιών, και ψηφιακές εισόδους σημάτων TTL (Transistor – transistorlogic).

Τα αναλογικά σήματα που εισέρχονται στις κάρτες DAQ ομαδοποιούνται σε τρία πεδία ως προς το χρόνο απόκτησης των τιμών τους :

- ▼ Συνεχές Μεταβλητού Πεδίου
- ▼ Πεδίο Χρόνου
- ▼ Πεδίο Συχνοτήτων

Επίσης τα σήματα διακρίνονται και ως προς τη στάθμη αναφοράς του δυναμικού τους, σε δυο κατηγορίες :

- a. Γειωμένα τα οποία έχουν στάθμη αναφοράς ως προς τη γη
- b. Επιπλέοντα σε αντίθετη περίπτωση

Τέλος στις συσκευές DAQ υπάρχουν τρεις διαφορετικοί σύνδεσης των σημάτων εισόδου προς μέτρηση :

- i. Διαφορική σύνδεση (Differential – DIFF)
- ii. Σύνδεση με αναφορά μοναδικά τερματισμένη (ReferencedSingle – Ended – RSE)
- iii. Σύνδεση χωρίς αναφορά μοναδικά τερματισμένη (NonReferencedSingle – Ended – NRSE)

Οι αναλογικές εισοδοι των καρτών DAQ έχουν κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία είναι :

1. Αριθμός καναλιών : Ο αριθμός των αναλογικών εισόδων, όπου μπορούν να συνδεθούν σήματα μετρήσεων.
2. Συχνότητα δειγματοληψίας : Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας τόσο περισσότερα δεδομένα συλλέγονται μέσα σε συγκεκριμένο χρόνο, με αποτέλεσμα τη καλύτερη αναπαράσταση του αρχικού σήματος.
3. Ανάλυση : Ο αριθμός των bit που χρησιμοποιεί ο μετατροπέας A/D για να αναπαραστήσει το αναλογικό σήμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάλυση τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός υποδιαίρεσεων του εύρους και τόσο μικρότερη είναι η αλλαγή τάσης στην είσοδό του.
4. Εύρος : Είναι το ανώτατο και το κατώτατο επίπεδο τάσης που ο μετατροπέας A/D μπορεί να κβαντίσει. Οι συσκευές DAQ πρέπει να προσφέρουν δυνατότητα επιλογής εύρους, έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί το εύρος του σήματος σε εκείνο του μετατροπέα A/D.
5. Πλάτος κώδικα : Είναι η μικρότερη ανιχνεύσιμη αλλαγή στο σήμα εισόδου, η οποία καθορίζεται από την ανάλυση και το εύρος μιας συσκευής DAQ. Ο τύπος που υπολογίζουμε το πλάτος κώδικα είναι ο εξής :

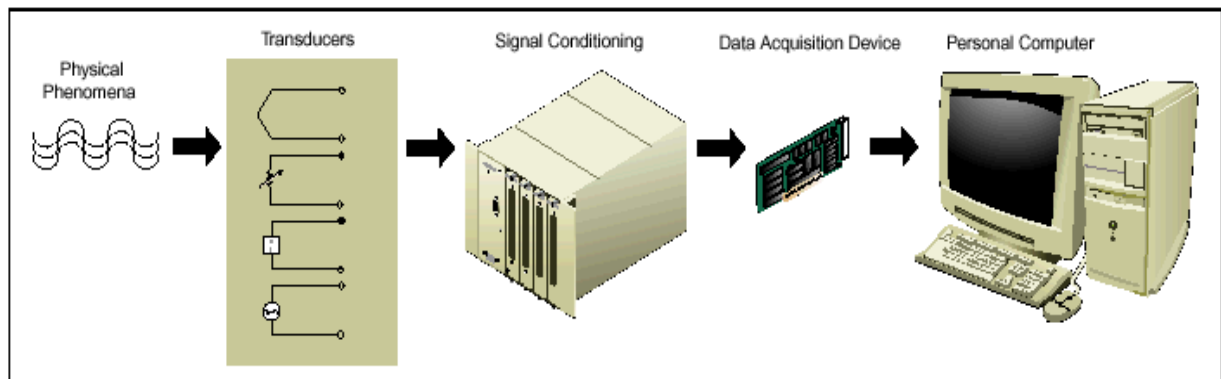
$$\text{ΠλάτοςΚώδικα} = \frac{\text{Εύρος}}{2^{\text{Ανάλυση}}}$$

Όσο μικρότερο είναι το πλάτος του κώδικα τόσο ακριβέστερες είναι οι μετρήσεις.

6. Αντίσταση εισόδου : Οι συσκευές DAQ έχουν υψηλή αντίσταση εισόδου έτσι ώστε να μην προκαλείται σφάλμα μέτρησης.

3.3.5.3 Signal conditioning

Όταν ληφθεί το ηλεκτρικό σήμα των αισθητηρίων, που στη περίπτωσή μας είναι το θερμοζεύγος και ο μετρητής διαφορικής πίεσης, πριν αυτό φτάσει σε μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακού παρεμβάλλεται το στάδιο της προσαρμογής του σήματος (signal conditioning), *Εικόνα 3.4*. Πρόκειται για μια συσκευή, που ονομάζεται signal conditioner, *Εικόνα 3.5*, και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ενός τύπου ηλεκτρικού σήματος σε ένα διαφορετικού τύπου. Η κύρια λειτουργία του είναι η μετατροπή ενός σήματος, που μπορεί να είναι δύσκολο να διαβαστεί από μια συμβατική διάταξη μετατροπής, σε μια πιο εύκολη μορφή (format) διαβάσματος.



Σχήμα 3.19: Διαδικασία απόκτησης και επεξεργασίας πληροφορίας



Εικόνα3.4: Άποψη signal conditioner (<http://www.ni.com>).

Για να γίνει η παραπάνω μετατροπή πρέπει να λάβουν χώρα αρκετές λειτουργίες, αυτές είναι :

- *Ενίσχυση (Amplification)*

Όταν ένα σήμα ενισχύεται, τότε το γενικό μέγεθος του αυξάνεται. Ένα παράδειγμα ενίσχυσης, είναι η μετατροπή ενός σήματος 0-10 mV σε 0-10 V.

- *Γραμμικότητα (Linearization)*

Ο κάθε αισθητήρας διαθέτει ένα χαρακτηριστικό ή ιδιότητα, του οποίου η τιμή μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η φυσική ποσότητα που μετρά ο αισθητήρας. Είναι επιθυμητό οι μεταβολές της φυσικής ποσότητας να προκαλούν αυστηρά ανάλογες μεταβολές της ιδιότητας του αισθητήρα. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται γραμμικότητα (linearity) και είναι ιδιαίτερης σημασίας. Εάν ο αισθητήρας δεν είναι γραμμικός, τότε η αντιστοίχιση των τιμών του μετρούμενου μεγέθους με τις τιμές εξόδου του αισθητήρα γίνεται με βάση τη καμπύλη βαθμονόμησης. Η μη-γραμμικότητα είναι συχνά εγγενής ιδιότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αισθητήρας και εν γένει είναι αδύνατο να μηδενιστεί.

- *Απομόνωση (Isolation)*

Η ηλεκτρική απομόνωση σπάει τη γαλβανική διαδρομή μεταξύ του σήματος εισόδου και σήματος εξόδου. Δηλαδή, δεν υπάρχει φυσική καλωδίωση μεταξύ της εισόδου και εξόδου. Συνήθως το σήμα εισόδου μεταφέρεται στην έξοδο, υπο μορφή οπτικού ή μαγνητικού σήματος, και αναδομείται στην έξοδό του. Με το σπάσιμο της γαλβανικής διαδρομής μεταξύ εισόδου και εξόδου, τυχόν ανεπιθύμητα σήματα που δημιουργούνται στην είσοδο εμποδίζονται από το να περάσουν στην έξοδο.

- *Φιλτράρισμα (Filtering)*

Τα φίλτρα απορρίπτουν τον ανεπιθύμητο θόρυβο μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Τα φίλτρα διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (lowpassfilters) χρησιμοποιούνται προκειμένου να αποκλειστούν οι υψηλής συχνότητας θόρυβοι σε ηλεκτρικές μετρήσει, όπως αυτές των 60 Hz.

- *Αντιστάθμιση Κρύας Επαφής (Cold Junction Compensation)*

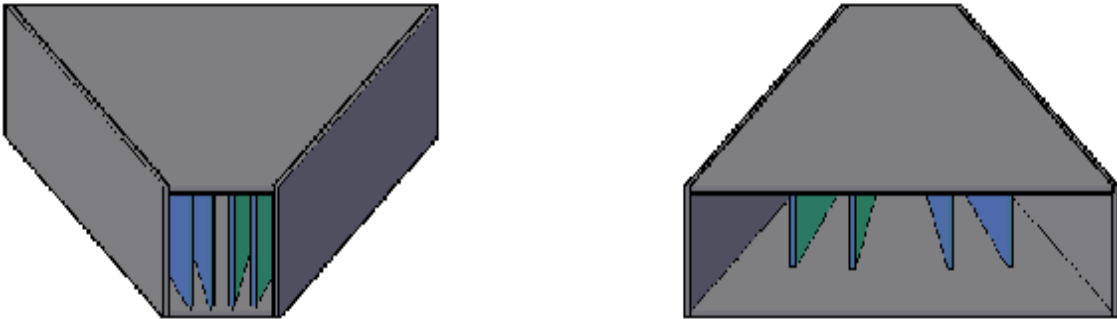
Πρόκειται για μια τεχνολογία που απαιτείται για ακριβείς μετρήσεις με θερμοζεύγη. Μια τάση δημιουργείται στο σημείο σύνδεσης μεταξύ του θερμοζεύγους και του τερματικού της συσκευής DAQ. Έτσι η τεχνολογία CJC βελτιώνει την ακρίβεια των μετρήσεων, παρέχοντας τη θερμοκρασία σε αυτή την ένωση και εφαρμόζει τη κατάλληλη διόρθωση για την απαλοιφή της.

- *Διέγερση (Excitation)*

Πολλοί αισθητήρες χρειάζονται κάποιο ρεύμα διέγερσης προκειμένου να αποδώσουν τη μετρούμενη επιθυμητή τάση. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο ρεύμα διέγερσης γιατί προκαλεί στο αισθητήριο αύξηση της θερμοκρασίας του φαινομένου που οδηγεί σε εσφαλμένες μετρήσεις. Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου πρέπει να παρέχεται ρεύμα χαμηλότερης διέγερσης.

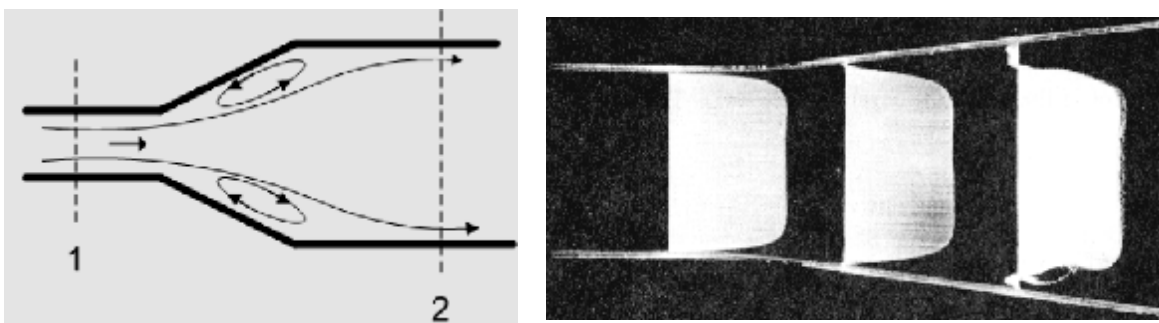
3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΚΡΟΦΥΣΙΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Στη πειραματική συσκευή προκύπτει ένα κατασκευαστικό εμπόδιο το οποίο πρέπει να ξεπεραστεί για την υλοποίηση του πειράματος. Αυτό προέκυψε γιατί ο κύριος αγωγός είναι τετραγωνικής διατομής διαστάσεων $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ και η ροή καταλήγει σε ορθογωνικής διατομής αγωγό $10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$, που είναι ο θάλαμος καύσης των υλικών. Γι' αυτό το λόγο, θα χρησιμοποιήσουμε έναν διαχύτη για την ένωση αυτών των δυο κομματιών. Όμοια και στο σημείο του θαλάμου καύσης όπου οι διαστάσεις του είναι $10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ τα καπναέρια οδηγούνται σε έναν αγωγό απόρριψης διαστάσεων $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, έτσι θα κατασκευαστεί ένας συγγύτης για την ένωσή τους.



Εικόνα 3.5: Αποψη συσκευών

Όταν το ρευστό εισέρχεται στον διαχύτη, τότε η ροή αποκλίνει αφού η επιφάνεια της διατομής της ροής αυξάνεται, με αποτέλεσμα οι γραμμές της ροής να αποκλίνουν και να μειώνεται η μέση ταχύτητα της ροής. Τότε παρατηρείται στις περιοχές μείωσης της ταχύτητας της ροής η εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης, Σχήμα 3.20. Το οριακό στρώμα αποκολλάται, η ροή αρχίζει να κινείται προς την ανάντη (αναστροφή ροής) σχηματίζοντας στροβίλους (δίνες), που απορροφούν ενέργεια από την ροή προκαλώντας σημαντικές τοπικές απώλειες ενέργειας.



Σχήμα 3.20: Αποκλίνουσα ροή και δημιουργία στροβίλων

Η κατασκευή του διαχύτη – συγχύτη πρέπει να πραγματοποιηθεί με γνώμονα την αποφυγή της εμφάνισης του φαινομένου αποκόλλησης. Γι' αυτό το λόγο, η γωνία που σχηματίζει ο κύριος άξονας της ροής με τα πλευρικά τοιχώματα, δε πρέπει να υπερβαίνει τις 7° (Sparrow E.M., 2009). Αφού καθοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διαχύτη - συγχύτη, θα τοποθετηθούν μέσα στον διαχύτη και τον συγχύτη οδηγά πτερυγία. Το αποτέλεσμα της τοποθέτησης των πτερυγίων είναι η τροφοδότηση του θαλάμου καύσης με παροχή αέρα ίδιας τιμής από κάθε διατομή των πτερυγίων. Έτσι από τη στιγμή που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του διαχύτη είναι εύκολο να τοποθετηθούν τα οδηγά πτερύγια. Το παρακάτω σχήμα μας δείχνει, πλέον, τα τοποθετημένα πτερύγια.



Σχήμα 3.21 : Τοποθέτηση οδηγών πτερυγίων

3.5 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΠΝΑΕΡΙΩΝ

Στο θάλαμο καύσης πραγματοποιείται η δοκιμή των υλικών σε φωτιά, η οποία περιλαμβάνει την ακτινοβολή τους από ένα θερμαντικό πάνελ και με τη χρήση ενός φλόγιστρου θα βοηθηθεί η εμφάνιση και η εξέλιξη της φωτιάς επάνω στο υλικό. Τα καπναέρια που θα προκύψουν από τη καύση των υλικών θα οδηγηθούν από το θάλαμο καύσης, μέσω του διαχύτη, σε ένα σύστημα απόρριψης. Αυτό το σύστημα απόρριψης είναι κατάλληλα εξοπλισμένο ώστε να επιτρέπεται η ποσοτική και η ποιοτική ανάλυση των καπναερίων μέσω του καλορίμετρου κώνου και της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier.

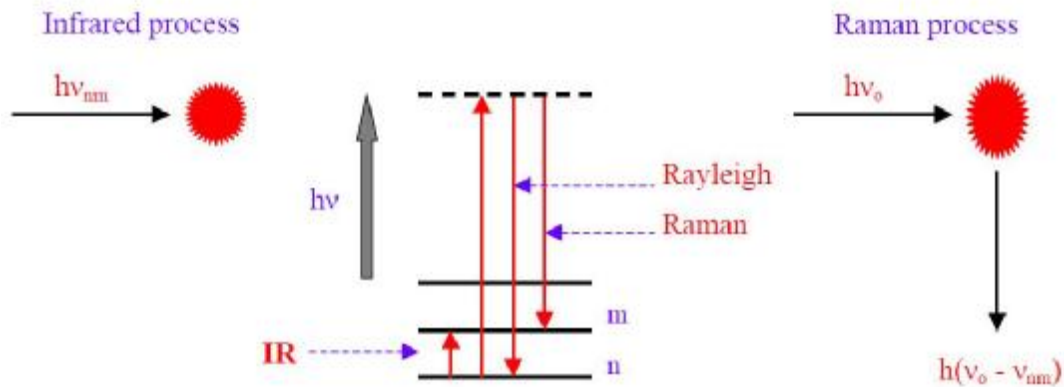
Με το καλορίμετρο κώνου επιτυγχάνεται μια σειρά από μετρήσεις όπως, την συνολική απώλεια μάζας του δοκιμίου, το ρυθμό θερμικής απελευθέρωσης (Heat Release Rate), τις συγκεντρώσεις σε O_2 , CO και CO_2 , τη παραγωγή καπνού, τη διάδοση της φλόγας κ.α. Η συμβολή της φασματοσκοπίας υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier έγκειται στην ποιοτική ανάλυση των καπναερίων μέσω της ανάλυσης της σύνθεσης των καπναερίων.

3.5.1 Φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό fourier transform infrared spectroscopy, ft-ir

Φασματοσκοπία είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (φως, ραδιοκύματα, ακτίνες x, κλπ.) με την ύλη. Τα άτομα, που αποτελούνται από ηλεκτρικά φορτισμένους πυρήνες και ηλεκτρόνια, μπορούν και αλληλεπιδρούν με το ταλαντευόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο του φωτός και απορροφούν την ενέργεια που μεταφέρει. Ένα άτομο ή μόριο διεγείρεται μόνο από φωτόνια ενέργειας ίσης με την διαφορά ενέργειας μεταξύ της διέγερσης και της ουδέτερης κατάστασης. Με ακτινοβολία (φως) υπερύθρων συχνοτήτων ($10-12800cm^{-1}$), λόγω της χαμηλής ενέργειας του φωτονίου, μπορούν να διεγερθούν μόρια από ένα δονητικό ενεργειακό επίπεδο σε άλλο. Η ενέργεια μιας τέτοιας ακτινοβολίας ($1-800meV$) είναι αρκετή, ώστε να προκαλέσει δονήσεις στα μόρια που την απορροφούν. Ωστόσο, οι περιστροφικές ενέργειες των μορίων είναι ακόμα μικρότερες από τις δονητικές, με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ακτινοβολία να είναι ικανή να προκαλέσει παράλληλα και περιστροφικές μεταπτώσεις. Στην περίπτωση αυτή, η φασματοσκοπία ονομάζεται δονητική (vibrational spectroscopy) (Καμίτσος Ε.Ι., 1999).

Οι δονητικές φασματοσκοπικές τεχνικές αποτελούν τα πιο χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση της φύσης των χημικών δεσμών ενός συστήματος και την μελέτη χημικών αντιδράσεων. Τέτοιες τεχνικές είναι μη καταστροφικές ως προς το δείγμα και σχετίζονται κυρίως με μελέτες μεταβάσεων μεταξύ δονητικών και περιστροφικών επιπέδων της βασικής ηλεκτρονικής κατάστασης ιόντων και μορίων. Η φασματοσκοπία υπερύθρου προκύπτει από απορρόφηση της ακτινοβολίας και μετάβαση σε ανώτερο ενεργειακό επίπεδο, ενώ η Raman φασματοσκοπία διαφέρει από την υπερύθη IR στο ότι η πληροφορία αποκτάται από σκέδαση φωτός. Κατά τη διαδικασία της Raman έχουμε διέγερση φωτονίων σε ένα virtual επίπεδο και μη ελαστική σκέδαση των φωτονίων κατά την αποδιέγερση, *Σχήμα 3.23*. Ένα ποσοστό των φωτονίων παραμένουν ενεργειακά αμετάβλητα και επιστρέφουν στην κατώτερη

ενεργειακά στάθμη (τότε έχουμε την λεγόμενη σκέδαση Rayleigh), ενώ ένα πολύ μικρό ποσοστό σκεδάζονται με μεταβολή της ενέργειας τους (σκέδαση Raman).



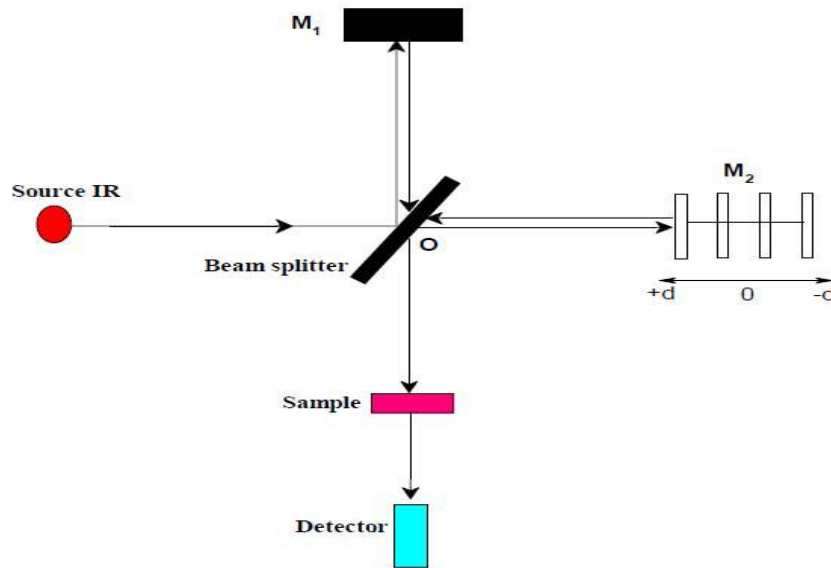
Σχήμα 3.22: Αναπαράσταση των δονητικών διαδικασιών IR και Raman (Καμίτσος Ε. Ι., 1999).

Στη φασματοσκοπία υπερύθρου μελετάμε την απορρόφηση υπερύθρου φωτός από το δείγμα συναρτήσει της συχνότητας. Το μόριο απορροφά ενέργεια $\Delta E = h \cdot \nu$ από την IR πηγή (που εκπέμπει ακτινοβολία έντασης I) σε κάθε δονητική μετάβαση.

3.5.1.1 Αρχή λειτουργίας φασματοφωτόμετρου, *ft-ir*

Τα δονητικά φάσματα λαμβάνονται με ένα φασματοφωτόμετρο FT-IR. Αυτό έχει ως βάση λειτουργίας το συμβολόμετρο Michelson, το οποίο χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένα συμβολογράφημα. Τη μαθηματική επεξεργασία του συμβολογραφήματος (μετασχηματισμός Fourier) δίνει το φάσμα απορρόφησης IR. Το συμβολόμετρο (interferometer) δυο δεσμών, αρχικά σχεδίασε ο Michelson. Πρόκειται για μια διάταξη οπτικών που χωρίζει μια δέσμη ακτινοβολίας σε δυο δέσμες και τις επανασυνθέτει, αφού πρώτα ακολουθήσουν ξεχωριστές διαδρομές που διαφέρουν στο μήκος. Οι μεταβολές της έντασης της επαλληλίας των δυο δεσμών ακτινοβολίας, ως συνάρτηση της διαφοράς των οπτικών διαδρομών καταγράφονται από ένα ανιχνευτή (Griffiths P.R., 1986).

Όλα τα φασματοφωτόμετρα μετασχηματισμού Fourier χρησιμοποιούν ένα συμβολόμετρο τύπου Michelson, Σχήμα 3.23. Η πολυχρωματική IR ακτινοβολία, που εκπέμπεται από την πηγή, φθάνει στο διαχωριστή δέσμης όπου είναι φτιαγμένος από ημιδιαφανές υλικό, συνήθως KBr, και το 50% της ακτινοβολίας ανακλάται ενώ το υπόλοιπο 50% περνά από το διαχωριστή. Ο διαχωριστής είναι τοποθετημένος σε γωνία 45° , ως προς την προσπίπτουσα δέσμη, ώστε να είναι μέγιστες οι εντάσεις τόσο του μέρους της δέσμης που ανακλάται, όσο και εκείνης που διαπερνά.



Σχήμα 3.23: Σχηματικό διάγραμμα του συμβολόμετρου Michelson (Griffiths P.R., 1986).

Η ακτινοβολία που παράγεται από την IR πηγή προσπίπτει στον διαχωριστή δέσμης, ο οποίος διαιρεί την ακτινοβολία σε δυο ίσα μέρη αποστέλλοντας το ένα τμήμα στο κάτοπτρο M_1 και το άλλο μισό στο M_2 . Η ανακλώμενη ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στο σταθερό καθρέπτη, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση L από το διαχωριστή, αφού διανύσει απόσταση $(L + d)$, ανακλάται από τον κινούμενο καθρέπτη και επανέρχεται στον διαχωριστή. Έτσι, η διαφορά των δυο οπτικών διαδρομών είναι $d = 2d$. Οι δυο ανακλώμενες δέσμες, όταν επιστρέψουν στο διαχωριστή, συμβάλουν έχοντας διανύσει διαφορετικό οπτικό δρόμο. Με την διαδικασία αυτή, δημιουργούνται οι κροσσοί συμβολής μέσω των οποίων γίνεται η κατάλληλη επιλογή των μηκών κύματος (Griffiths P.R., 1986).

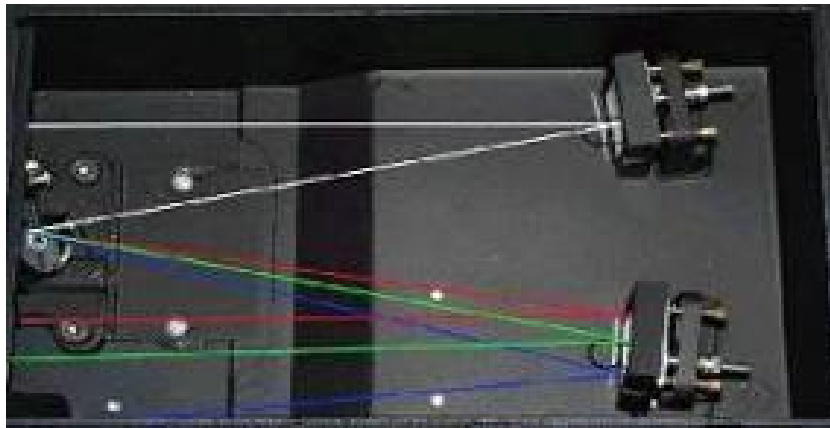
Στην περίπτωση μονοχρωματικής δέσμης φωτός μήκους κύματος λ (αν και στην περίπτωση της φασματοφωτομετρίας FT-IR δεν χρησιμοποιείται μονοχρωματική ακτινοβολία) που εκπέμπεται από την πηγή και συνενώνεται στην πλάκα B , υπόκειται σε ενίσχυση ή καταστροφική συμβολή ανάλογα με τις αποστάσεις της πλάκας B από τα κάτοπτρα M_1 και M_2 . Εάν οι αποστάσεις αυτές είναι ίσες ή διαφέρουν κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος της μονοχρωματικής δέσμης, τότε δημιουργείται ενισχυτική συμβολή με αποτέλεσμα να τετραπλασιάζεται η ένταση. Εάν, όμως οι αποστάσεις της B από τα M_1 και M_2 δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος, τότε οι δέσμες φωτός ανακλώνται στα κάτοπτρα και επανέρχονται στην B , όπου και αλληλοεξουδετερώνονται.

Σε ένα φασματοφωτόμετρο FT-IR η πηγή εκπέμπει ένα συνεχές φάσμα. Κατά την έξοδο από το συμβολόμετρο έχουμε επαλληλία των διαφόρων φασματικών συνιστωσών των επιμέρους δεσμών. Το τελικό αποτέλεσμα προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων ακτινοβολίας που αντιστοιχούν σε κάθε φασματική περιοχή. Έτσι για μηδενική διαφορά οπτικού δρόμου όλες οι φασματικές συνιστώσες είναι σε φάση και η συνολική ένταση ακτινοβολίας είναι μέγιστη. Καθώς αυξάνεται η διαφορά οπτικού δρόμου ΔL η επαλληλία για κάθε φασματική συνιστώσα οδηγεί σε μέγιστο ή ελάχιστο ανάλογα με τον λόγο. Έτσι η συνολική ένταση μειώνεται ή αυξάνεται με όλο και μικρότερο πλάτος διαμόρφωσης. Μετά από μια μέγιστη διαφορά οπτικού δρόμου δεν υπάρχει πια κανένας συσχετισμός φάσης μεταξύ των διάφορων φασματικών συνιστωσών και η συνολική ένταση

είναι πια σταθερή και ανεξάρτητη από την διαφορά οπτικού δρόμου. Όπως αποδεικνύεται το πλάτος διαμόρφωσης των πολυχρωματικών κροσσών συμβολής είναι συνάρτηση της διαφοράς οπτικού δρόμου και σχετίζεται με τον μετασχηματισμό Fourier της φασματικής κατανομής της πηγής.

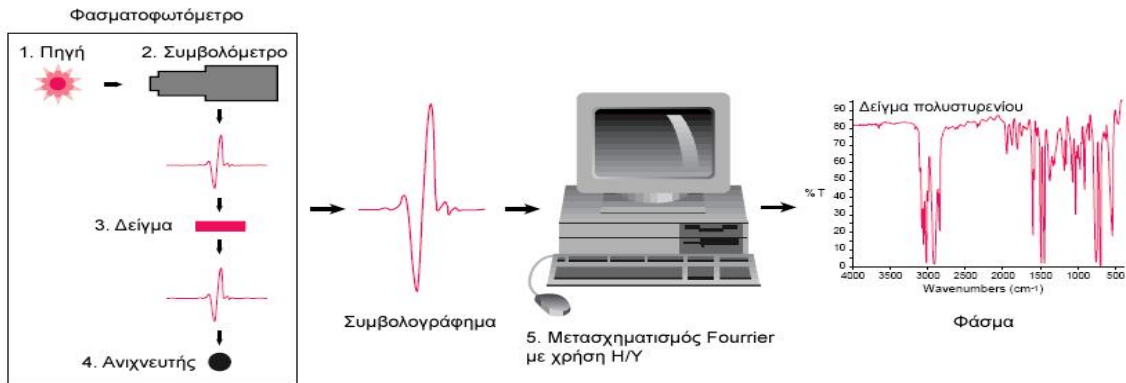
3.5.1.2 Δυνατότητες και πλεονεκτήματα φασματοφωτόμετρον, *ft-ir*

Η τεχνική αυτή του FT-IR έχει σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες τεχνικές φασματοσκοπίας . Χρησιμοποιεί το συμβολόμετρο Michelson για επιλογή μήκους κύματος και το μετασχηματισμό fourier για τη δημιουργία του φάσματος. Κατά συνέπεια παίρνουμε φάσματα υψηλής ποιότητας. Στην τεχνική FT-IR με διαβαθμισμένο πλέγμα (grating) χρησιμοποιείται ένα πλέγμα οπτικά διαβαθμισμένο για την ανάλυση της IR και την επιλογή μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, το οποίο αποτελείται από μια επιφάνεια που έχει επιστρωθεί με μια λεπτή γυαλιστερή μεταλλική στοιβάδα πάνω στην οποία έχουν χαραχθεί αυλάκια.



Εικόνα 3.6: Διάταξη FT-IR με διαβαθμισμένο πλέγμα (grating) (GriffithsP.R., 1986).

Τα φασματοφωτόμετρα FT-IR παρουσιάζουν σαφή πλεονεκτήματα. Κατ' αρχήν, η χρήση υπολογιστή στη φασματοσκοπία FT-IT προσφέρει τη δυνατότητα ταχείας λήψης πολλαπλών φασμάτων, υπολογισμού του μέσου όρου τους, επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων. Τούτο συνεπώς οδηγεί στην καταγραφή φασμάτων υψηλής ποιότητας. Είναι δυνατή επίσης η αφαίρεση φασμάτων και επομένως η ακριβής ανίχνευση πολύ μικρών μεταβολών που οφείλονται τόσο σε μεταβαλλόμενη σύσταση, όσο και στη φυσική κατάσταση του δείγματος.



Σχήμα 3.24: Διαδικασία λειτουργίας φασματοφωτόμετρου.

Η ύπαρξη <<βιβλιοθήκης>> φασμάτων υπερύθρου παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης του φάσματος ενός μείγματος συστατικών στα επί μέρους συστατικά του και επομένως τη δυνατότητα ποιοτικής/ποσοτικής ανάλυσης του μείγματος. Η μεγάλη ευαισθησία που χαρακτηρίζει τη φασματοσκοπία FT-IR μετατρέπεται σε μειονέκτημα στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα του φωτόμετρου δεν έχει πλήρως εκκενωθεί, ή αντικατασταθεί με άζωτο. Τότε, το φάσμα υπερύθρου παρουσιάζει έντονες απορροφήσεις που οφείλονται στο H_2O και το CO_2 του χώρου του φωτομέτρου. Το σοβαρότερο όμως μειονέκτημα της φασματοσκοπίας FT-IR είναι η απαιτούμενη ακριβής ρύθμιση των οπτικών του οργάνου, κυρίως του συμβολόμετρου Michelson. Σε αντίθεση με τα συμβατικά φασματοφωτόμετρα, που δίνουν χαμηλής ποιότητας αλλά χρησιμοποιήσιμα φάσματα όταν δεν είναι καλά ρυθμισμένα.

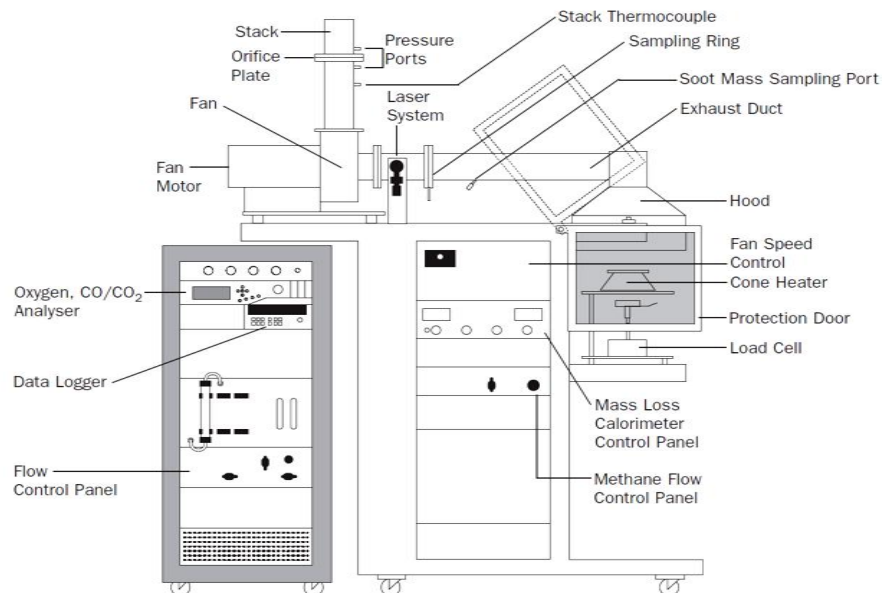
Σε σύγκριση με τα συμβατικά IR φασματοφωτόμετρα με διαβαθμισμένο πλέγμα, τα FT-IR φασματοφωτόμετρα υπερέχουν σημαντικά, καθώς ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο (S/N) είναι πολύ μεγαλύτερος. Η υπεροχή των FT-IR φασματοφωτόμετρων οφείλεται στα βασικά χαρακτηριστικά κατασκευής και λειτουργίας τους, που έχουν ως αποτέλεσμα :

1. Όλες οι συχνότητες που εκπέμπονται από την πηγή να φθάσουν ταυτόχρονα στον ανιχνευτή.
2. Ένα μεγάλο εμβαδόν της δέσμης να περνά μέσα από το δείγμα.
3. Και η θέση του κινούμενου καθρέπτη να προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια.

3.5.2 Καλορίμετρο κώνου (Cone calorimeter)

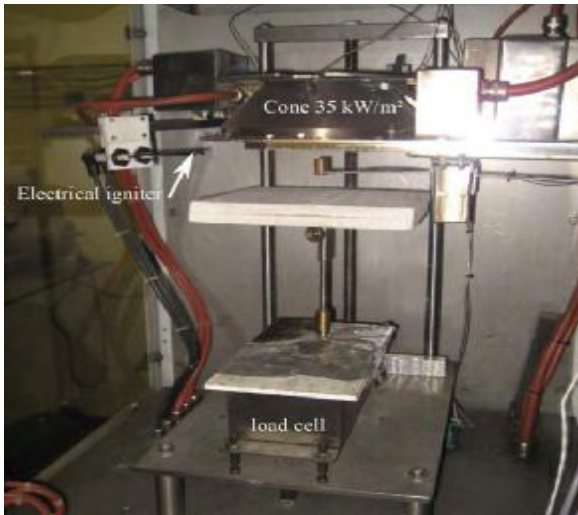
3.5.2.1 Εισαγωγή

Το θερμιδόμετρο κώνου αποτελεί σημαντικό εργαλείο εργαστηριακής κλίμακας στο πεδίο των δοκιμών αντίδρασης στη φωτιά με την μέθοδο θερμιδομετρίας οξυγόνου. Το θερμιδόμετρο κώνου αποτελείται από αρκετά μέρη και συσκευές. Όλα αυτά μαζί συμβάλλουν στη μέτρηση, ρύθμιση και τη προσαρμογή αρκετών παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας, της μάζας, της παροχής του αέρα κ.α. Στο Σχήμα 3.25 παρουσιάζονται όλα τα μέρη που αποτελούν τη συσκευή :



Σχήμα 3.25: Σχηματική άποψη ενός καλορίμετρου κώνου (JohanLindholm, 2001).

Το δοκίμιο τοποθετείται σε μια μεταλλική κυψέλη και στη συνέχεια τοποθετεί σε κατάλληλο υποδοχέα. Ο υποδοχέας μπορεί να καταγράψει το βάρος του δοκιμίου κατά τη διάρκεια πειράματος. Επίσης ανάλογα με το εκάστοτε υπο δοκιμή υλικό, ο υποδοχέας επιδέχεται τροποποίηση. Η τροποποίηση έχει να κάνει με τη χρήση ενός μεταλλικού πλέγματος προκειμένου αν λιώσει το δοκίμιο να μην μετακινηθεί από τη θέση του, *Εικόνα 3.7.α, Εικόνα 3.7.β.*



Εικόνα 3.7.α :Εγκατάσταση κώνου καλορίμετρου



Εικόνα 3.7.β : Μεταλλικός υποδοχέας δοκιμίου, με πλέγμα στην επιφάνεια του δοκιμίου

Μια ηλεκτρική συσκευή ανάφλεξης είναι εγκατεστημένη ακριβώς επάνω από το δοκίμιο και κάτω από τον κωνικό θερμοπομπό. Όταν το δοκίμιο θερμανθεί τότε θα ξεκινήσουν να εκπέμπονται εύφλεκτα αέρια τα οποία θα αναφλεχθούν από την ηλεκτρική συσκευή ανάφλεξης. Όταν η φωτιά εξελιχθεί και καταλάβει όλο το δοκίμιο, τότε η συσκευή ανάφλεξης απενεργοποιείται και απομακρύνεται, *Εικόνα 3.8α* και *Εικόνα 3.8β*.



Εικόνα 3.8α: Εμφάνιση των πρώτων αερίων και χρήση φλόγιστρου



Εικόνα 3.8β: Έναρξη ανάφλεξης φωτιάς

Τα αέρια της καύσης που προέκυψαν από τη καύση του δοκιμίου συλλέγονται στο κώνο απαγωγής που βρίσκεται επάνω από το θερμοπομπό. Στη συνέχεια οδηγούνται μέσω ενός αγωγού σε έναν δακτύλιο (sampling ring) στον οποίο το αέριο καταγράφεται. Στον αγωγό απαγωγής των καπναερίων, πριν το δακτύλιο, είναι τοποθετημένος ένας ανεμιστήρας ο οποίος ρυθμίζει τη παροχή των καπναερίων. Πριν τα καπναέρια φτάσουν τους αναλυτές αερίων, και το δακτύλιο που πραγματοποιούνται οι επιθυμητές μετρήσεις, διέρχονται από δυο φίλτρα τα οποία συμβάλλουν στη κατακράτηση σωματιδίων καθώς και στην απομάκρυνση ανεπιθύμητου νερού. Επίσης μεταξύ του δακτυλίου και του ανεμιστήρα υπάρχει ένα σύστημα καταγραφής του παραγόμενου καπνού, το οποίο μετράει το ποσοστό του καπνού μέσω μιας φωτομετρικής ακτίνας λέιζερ.

Για την διεξαγωγή ενός πειράματος με θερμιδόμετρο κώνου απαραίτητος είναι ο αναλυτής οξυγόνου. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της καύσης, προστίθενται στη συσκευή και οι αναλυτές μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Για περεταίρω ανάλυση των προϊόντων της καύσης, στον αγωγό απαγωγής των καπναερίων τοποθετείται ένα φασματοφωτόμετρο υπερύθρου με μετασχηματισμό fourier.

3.5.2.2 Διεξάγοντας πείραμα

Πριν τη διεξαγωγή κάποιου πειράματος, απαιτείται κάποια σειρά από βαθμονομήσεις. Οι αναλυτές αερίων καθώς και ο λέιζερ μετρητής καπνού πρέπει πάντοτε να παραμένουν ενεργοποιημένοι και έτοιμοι για χρήση, χωρίς να απαιτείται χρόνος για ζέσταμα είτε για σταθεροποίηση του συστήματος, όμως ο υπόλοιπος εξοπλισμός πρέπει να ενεργοποιηθεί και να ρυθμιστεί. Τα φίλτρα στον αγωγό απαγωγής πρέπει να ελεγχθούν και όπου απαιτείται να αντικατασταθούν. Το σύστημα καταγραφής καπνού είναι βαθμονομημένο σε μηδενική τιμή όταν η δέσμη της ακτίνας λέιζερ είναι πλήρως μπλοκαρισμένη, ενώ στη μέγιστη τιμή όταν η ακτίνα λέιζερ δεν εμποδίζεται. Οι αναλυτές αερίων βαθμονομούνται με τη χρησιμοποίηση αζώτου για μηδενική τιμή και μίγμα αερίων CO/CO_2 $\left(\begin{matrix} 0,85 \\ 8,5\% \end{matrix} \right)$ για τα επιθυμητά εύρη των αναλυτών μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Ο υποδοχέας του δοκιμίου πρέπει να τοποθετηθεί σε ένα τέτοιο ύψος ώστε η επιφάνεια του να απέχει 25mm από τον θερμοπομπό. Πριν ξεκινήσει το πείραμα, αφήνουμε τη συσκευή να καταγράψει δεδομένα για 60 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ξεκινάμε το πείραμα χρησιμοποιώντας ως αφετηρία αυτά τα 60 sec (Johan Lindholm, 2001).

3.5.2.3 Ερμηνεύοντας τα πειραματικά αποτελέσματα

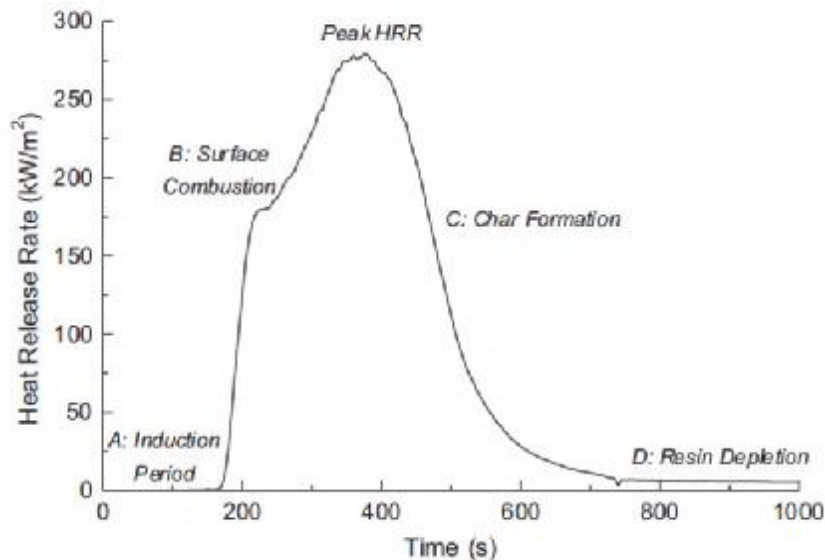
Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από ένα πείραμα θερμιδόμετρου κώνου περιλαμβάνουν ένα εύρος από παραμέτρους και δεδομένα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, όπως :

- § Μοντελοποίηση φωτιάς
- § Πρόβλεψη για πυρκαγιά πλήρους κλίμακας
- § Κατάταξη προϊόντων ανάλογα με τη συμπεριφορά τους σε πυρκαγιά
- § Τεστ Περνά/Δεν Περνά σε υπο εξέλιξη νέων υλικών

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που λαμβάνονται από πειράματα θερμιδόμετρου κώνου περιγράφονται στη συνέχεια.

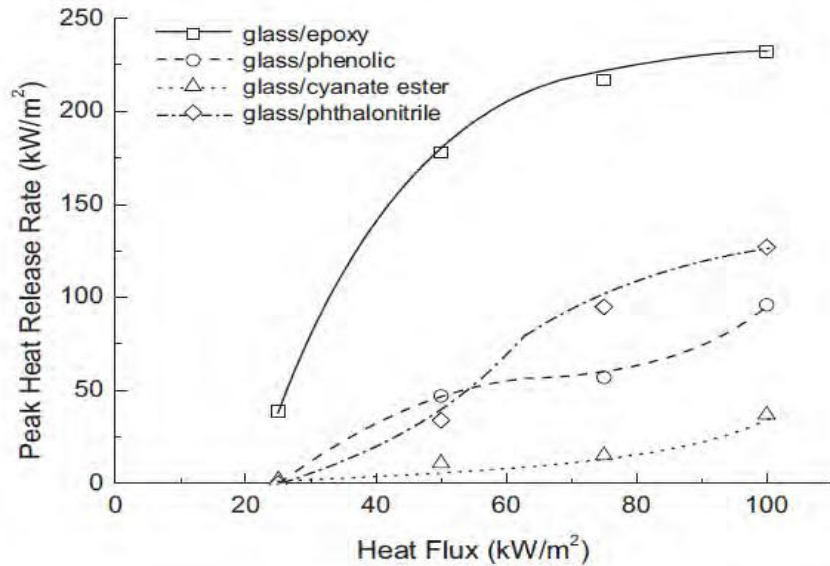
- *Heat Release Rate, (HRR)*

Ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης είναι ο σημαντικότερος παράγοντας συμπεριφοράς στη συμπεριφορά ενός υλικού σε περιβάλλον φωτιάς, επειδή η θερμότητα που απελευθερώνεται από ένα υλικό που καίγεται παρέχει την επιπλέον θερμική ενέργεια που απαιτείται για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της φωτιάς (Maritz A.P., et al, 2006), (Babrauskas V., et al, 1997). Η μέγιστη τιμή του HRR εμφανίζεται συνήθως αμέσως μετά την ανάφλεξη των αερίων, και είναι συνήθως μια καλή ένδειξη της αναφλεξιμότητας των υλικών. Ένα παράδειγμα του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης στη διάρκεια του χρόνου για ένα σύνθετο υλικό (γυαλιού/βινυλεστέρα) που εκτίθεται σε συνεχή θερμοκρασιακή ροή, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.26. Το προφίλ του HRR διακυμαίνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου εξαιτίας των διάφορων χημικών και θερμικών συμβάντων που εξελίσσονται στο υλικό όταν εκτίθεται σε φωτιά, και αυτά έχουν σχεδιαστεί από την αρχή ως το τέλος τους με A έως το D στη γραφική παράσταση. Στο σημείο A, εμφανίζεται μια εισαγωγική περίοδος στη διάρκεια της οποίας το υλικό δεν απελευθερώνει καθόλου θερμότητα. Κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης του υλικού στην εξωτερική θερμική ροή είναι ανεπαρκής η ακτινοβολήση του υλικού μέχρι την θερμοκρασία αποσύνθεσής του. Έπειτα από αυτή τη καθυστέρηση, ακολουθεί μια ραγδαία αύξηση της τιμής του HRR, σημείο B, εξαιτίας της ανάφλεξης των εύφλεκτων αερίων που προέρχονται από την επιφάνεια του υλικού. Η καμπύλη συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή της, και στη συνέχεια σταδιακά μειώνεται αφού η φωτιά πλέον σιγοκαίει την επιφάνεια του δοκιμίου, σημείο C. Τελικά η καμπύλη HRR γίνεται αμελητέα όταν η δομή του πολυμερούς έχει υποβαθμιστεί εντελώς.



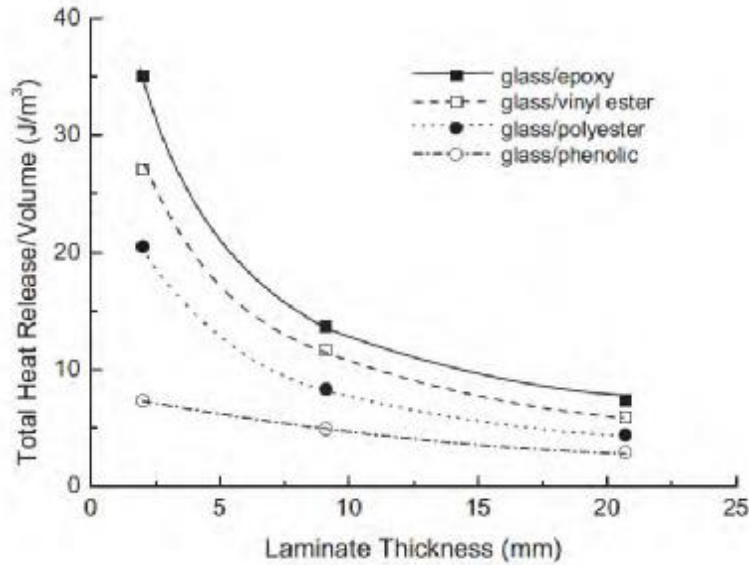
Σχήμα 3.26: Προφίλ ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης σύνθετου υλικού (γυαλιού/βινυλεστέρα) υπο σταθερή θερμική ροή 50 kW/m^2

Η ακτινοβολούμενη θερμική ροή επηρεάζει σημαντικά τον αριθμό θερμικής απελευθέρωσης σε διάφορα σύνθετα υλικά. Στο Σχήμα 3.27, παρουσιάζεται η επιρροή της μεταβολής της θερμικής ροής με τον ρυθμό θερμικής απελευθέρωσης από μια ποικιλία σύνθετων υλικών.



Σχήμα 3.27: Μεταβολή της μέγιστης τιμής του HRR με τη θερμική ροή.

Επίσης ο HRR εξαρτάται από το πάχος των υπο δοκιμή υλικών με αρκετές μελέτες να αναφέρουν μεγάλη μείωση στη μέγιστη τιμή του HRR με την αύξηση του πάχους. Στο Σχήμα 3.28, παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης του πάχους του δοκιμίου στην θερμότητα που απελευθερώνεται, από τέσσερα διαφορετικά υλικά υαλονημάτων. Παρατηρείται ότι ο HRR μειώνεται σημαντικά για τιμές πάχους μεγαλύτερες των 8mm. Όταν τα σύνθετα υλικά είναι αρκετά λεπτά (τιμές μικρότερες των 8mm), τότε η θερμότητα διαπερνά πολύ γρήγορα το υλικό, προκαλώντας την ολοκληρωματική διάσπαση της μήτρας του υλικού σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, οδηγώντας σε αύξηση του ρυθμού έκλυσης θερμότητας.



Σχήμα 3.28: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου με την ολική θερμική απελευθέρωση ανά μονάδα όγκου σύνθετου υλικού (Gibson A.G., et al, 1995).

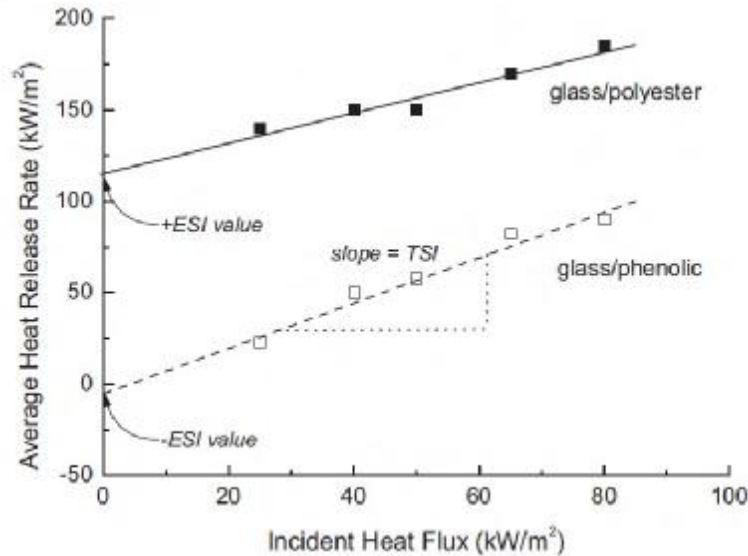
Ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (HRR) υπολογίζεται από τη συγκέντρωση οξυγόνου στα καπναέρια (Johan L. et al, 2001). Το λογισμικό του θερμιδόμετρου κώνου υπολογίζει τον HRR σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση :

$$\dot{Q} = (13,1 \cdot 10^3) \cdot 1,10 \cdot C \cdot \frac{(0,2095 - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5 \cdot X_{O_2})} \quad (3.28)$$

- όπου \dot{Q} ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (kW)
 C συντελεστής ροής μετρητή orifice ($kg^{1/2} m^{1/2} k^{1/2}$)
 ΔP πτώση πίεσης στο μετρητή orifice (Pa)
 T_r θερμοκρασία ρευστού στο μετρητή orifice (K)
 X_{O_2} μετρούμενη τιμή γραμμομορίου οξυγόνου στα καπναέρια

- *Thermal stability index, (TSI)*

Άλλη μια ιδιότητα αντίδρασης ενός υλικού σε φωτιά, είναι ο δείκτης TSI, ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η ευφλεκτότητα ενός υλικού. Ο TSI υπολογίζεται από τη γραφική παράσταση της μέσης τιμής του HRR με τη προσπίπτουσα θερμική ροή, Σχήμα 3.29. Στην εν λόγω γραφική παράσταση υποδεικνύεται κατά πόσο είναι εύφλεκτη η φωτιά που εξελίσσεται επάνω στο υλικό να διατηρηθεί χωρίς τη χρησιμοποίηση εξωτερικής πηγής θερμικής ροής. Στη γραφική παράσταση η κλίση της καμπύλης είναι ο δείκτης TSI, όσο μικραίνει αυτός ο δείκτης τόσο μικρότερη εξωτερική θερμική ροή θα χρειαστεί το υλικό για να καεί, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του δείκτη τόσο μεγαλύτερη θερμική ροή θα χρειαστεί για να καεί το υλικό. Τα σύνθετα θερμοπλαστικά υλικά έχουν σχετικά υψηλή τιμή TSI, συγκριτικά με τα υπόλοιπα υλικά.

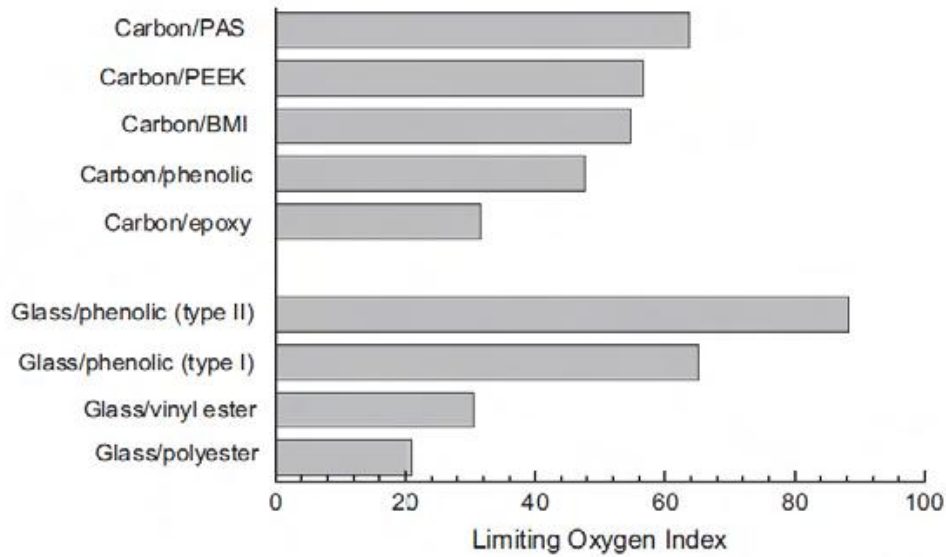


Σχήμα 3.29: Γραφική παράσταση του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης με την προσπίπτουσα θερμική ροή, για δυο διαφορετικά υλικά (Egglestone G.T., et al, 1994).

- *Limiting oxygen index, (LOI)*

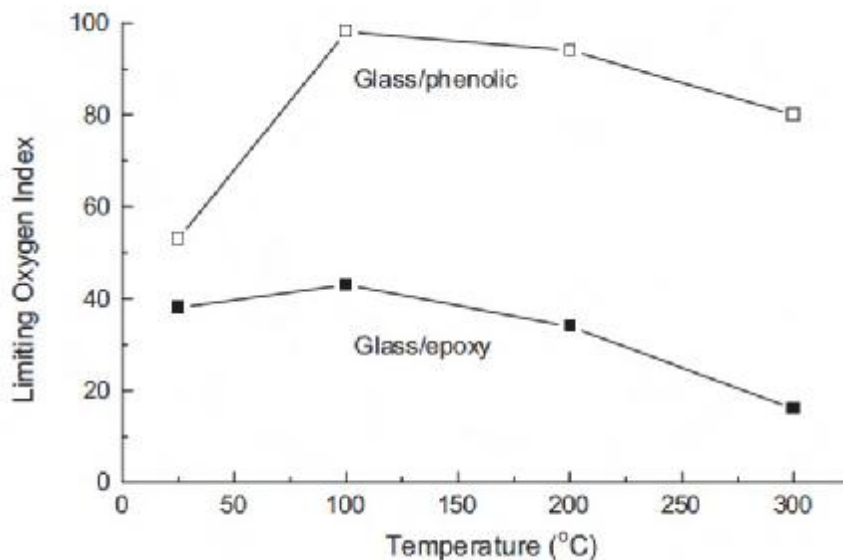
Ο δείκτης LOI χρησιμοποιείται συχνά για την ποσοτικοποίηση της ευφλεκτότητας των οργανικών πολυμερών και των σύνθετων υλικών. Ο δείκτης LOI προσδιορίζεται ως η μικρότερη ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται για να διατηρηθούν οι φλόγες της καύσης, και επιπλέον η συγκεκριμένη τιμή χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός φλεγόμενου υλικού να αποσβένει από μόνου του τις φλόγες (Weil E.D. et al, 1992). Ο προσδιορισμός του δείκτη LOI επιτυγχάνεται με την έκθεση ενός υλικού σε φλόγες υπο διάφορα επίπεδα οξυγόνου, έτσι με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται το μικρότερο ποσοστό οξυγόνου που επιτρέπει στο δείγμα να εμφανίζει φλόγες μικρής κλίμακας. Δυστυχώς όμως η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εξετάζει το δείγμα σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς, επομένως ο δείκτης LOI δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς σε φωτιά ενός υλικού. Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για την κατάταξη των πολυμερών σύνθετων υλικών ως προς την ευφλεκτότητά τους (LeBras M. et al, 1998),(Kourtides D.A. et al, 1979),(Macaine D.P. et al, 1983),(Bates S.C. et al, 1993).

Οι τιμές του LOI για μια γκάμα θερμοσκληρυνόμενων και θερμοπλαστικών σύνθετων υλικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.30. Φαίνεται ότι οι τιμές του LOI για εύφλεκτα σύνθετα υλικά, όπως ο πολυεστέρας, βινυλεστέρας και οι εποξειδικές ρητίνες, είναι κάτω από την τιμή των 30 LOI. Αυτές οι τιμές καθορίστηκαν σε θερμοκρασία δωματίου. Οι τιμές αυτές όμως μπορούν να αλλάξουν δραματικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, συνήθως με την αύξηση της η τιμή του LOI μειώνεται (Weil E.D. et al, 1992),(Macaine D.P. et al, 1983),(Bates S.C. et al, 1993).



Σχήμα 3.30: Τιμές των LOI για διάφορα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου (Soratha U. et al, 1993),(Allison D.M. et al, 1991).

Το Σχήμα 3.31, παρουσιάζει την μεταβολή δυο σύνθετων υλικών υαλονημάτων για ένα θερμοκρασιακό φάσμα από 25°C έως 300°C . Αξιοσημείωτη είναι η τιμή των 100°C , αφού μέχρι αυτή την τιμή ο LOI αυξάνεται και με την υπέρβαση αυτής της τιμής παρατηρείται σταδιακή μείωση αφού απαιτεί λιγότερη θερμότητα προκειμένου να διατηρηθεί η καύση.



Σχήμα 3.31: Επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή LOI (Weil E.D. et al, 1992).

- *Extinction flammability index, (EFI)*

Ο δείκτης ESI είναι μια χρήσιμη ποσοτική μέτρηση της ευφλεκτότητας των σύνθετων υλικών, ωστόσο θεωρείται δευτερεύουσας σημασίας αφού κυρίαρχη ιδιότητα της ευφλεκτότητας είναι ο δείκτης HRR(Brown J.E. et al, 1988),(Hume J. et al, 1992),(Brown J.R. et al, 1997). Ο ESI καθορίζεται μέσω της γραφικής παράστασης του μέσου HRR με την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία, όπως παρουσιάζεται στη *Σχήμα 3.29*. Το σημείο της καμπύλης που τέμνει τον κατακόρυφο άξονα, σημείο όπου η θερμική ροή είναι μηδενική, ορίζεται ο δείκτης ESI. Αρνητική τιμή του ESI υποδηλώνει ότι με την απομάκρυνση της θερμικής ροής που εφαρμόζεται στο υλικό, η φωτιά που εξελίσσεται θα κατασβηστεί μόνη της αρκετά γρήγορα. Ενώ όταν ένα συνθετικό έχει θετική τιμή ESI, υποδηλώνει ότι η καύση θα συνεχιστεί ακόμη και όταν η θερμική ροή απομακρυνθεί.

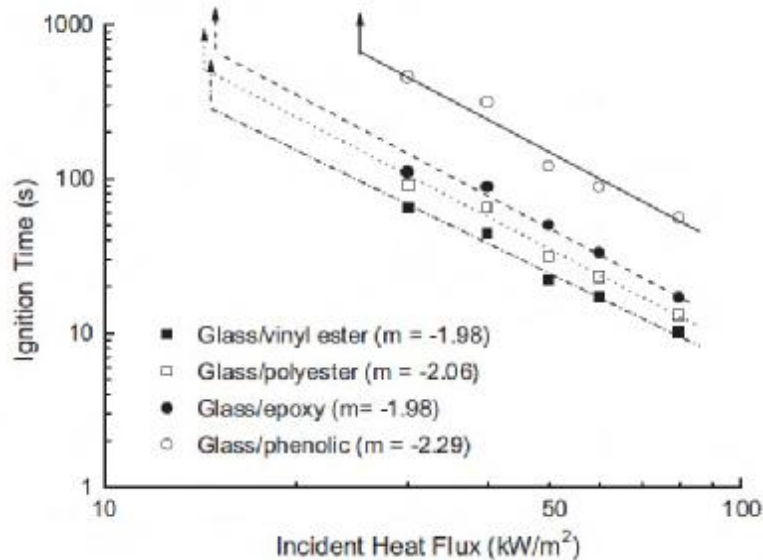
- *Time to ignition*

Η ανάφλεξη είναι μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα εύφλεκτα υλικά διότι καθορίζει την έναρξη της καύσης. Οι οργανικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως στα σύνθετα υλικά μπορούν να αναφλεγούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα όταν εκτεθούν σε φωτιά, με αποτέλεσμα υψηλών θερμοκρασιών φλόγες να βοηθούν τη διάδοση της φωτιάς. Γι' αυτό το λόγο ο χρόνος ανάφλεξης είναι πολύ σημαντικό στοιχείο για την συμπεριφορά των υλικών σε φωτιά. Η ανάφλεξη συνήθως συμβαίνει όταν η επιφάνεια του σύνθετου υλικού θερμανθεί μέχρι την θερμοκρασία ενδοθερμικής διάσπασης της πολυμερούς μήτρας. Η θερμική διάσπαση της μήτρας παράγει εύφλεκτες ποσότητες αερίων που κατευθύνονται από το υλικό στη φωτιά. Όταν το ποσοστό των εύφλεκτων αερίων φτάσει σε μια κρίσιμη συγκέντρωση τότε συμβαίνει η ανάφλεξη.

Ο χρόνος ανάφλεξης εξαρτάται από μια ποικιλία παραγόντων όπως η διαθεσιμότητα οξυγόνου, η θερμότητα και οι χημικές και οι θερμοφυσικές ιδιότητες της πολυμερούς μήτρας, καθώς και η ενίσχυση του υλικού σε ίνες. Σε αυτό το κομμάτι θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες ανάφλεξης των σύνθετων ελασμάτων καθώς και των σύνθετων σάντουιτς. Ο χρόνος ανάφλεξης προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τη τεχνική θερμιδόμετρου κώνου με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι η αυθόρμητη ανάφλεξη και ο δεύτερος είναι η εξαναγκασμένη ανάφλεξη μέσω ηλεκτρικού αισθητήρα. Στη περίπτωση μας θα μελετηθεί η περίπτωση της εξαναγκασμένης ανάφλεξης.

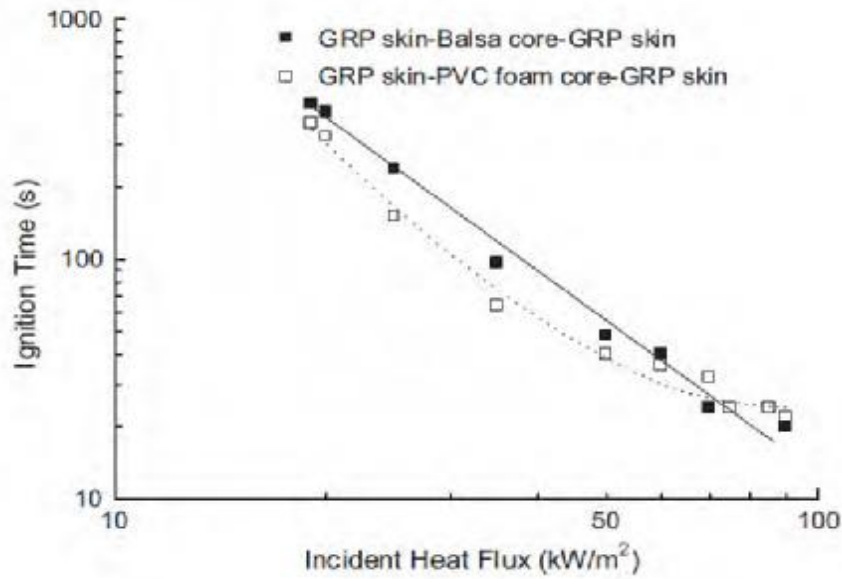
Από τη μια πλευρά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εστιάζεται στα σύνθετα ελάσματα που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική, στην ναυτιλία κ.λ.π. Γι' αυτό το λόγο εξετάστηκε ο χρόνος ανάφλεξης διάφορων ελασμάτων, όπως εποξειδικές ρητίνες, πολυεστέρες, βινυλεστέρες και φαινολικές ρητίνες σε διάφορα περιβάλλοντα φωτιάς (Sastri S.B. et al, 1997),(Scudamore M.J. et al, 1994),(Brown J.R. et al, 1996). Στο *Σχήμα 3.32* παρουσιάζεται η επίδραση μιας εξωτερικής θερμικής πηγής στον χρόνο ανάφλεξης σε ελάσματα με υαλονήματα και διάφορες ρητίνες για μήτρες. Τα σύνθετα υλικά δεν αναφλέγονται κάτω από μια θερμοκρασιακή ροή, ακόμη κι αν έχουν εκτεθεί για πολύ ώρα σε αυτή. Αυτή η κρίσιμη τιμή της θερμοκρασιακής ροής για τον πολυεστέρα, τον βινυλεστέρα, και τις εποξικές ρητίνες είναι περίπου τα $13kW/m^3$ ενώ για τα φαινολικά ελάσματα είναι τα $25kW/m^3$. Αξιοσημείωτη είναι η εξαιρετικά ικανότητα της αντίστασης σε ανάφλεξη των φαινολικών ρητινών, γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως. Η ανάφλεξη κάτω από αυτές τις τιμές δεν επιτυγχάνεται αφού η θερμοκρασιακή ροή είναι πολύ χαμηλή για να θερμάνει τη μήτρα

μέχρι τη θερμοκρασία αποσύνθεσης. Η ραγδαία μείωση του χρόνου ανάφλεξης με την αύξηση της θερμοκρασιακής ροής αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση της θερμοκρασιακής ροής αποδίδεται στην μεγάλη αύξηση του ρυθμού πυρόλυσης μέσω της αύξησης της παροχής των εύφλεκτων αερίων (Brown J.R. et al, 1988).



Σχήμα 3.32: Γραφική παράσταση του χρόνου ανάφλεξης με την προσπίπτουσα ακτινοβολία για τέσσερα διαφορετικά υλικά (Gibson A.G. et al, 1995).

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν πολύ περιορισμένες πληροφορίες για εφαρμογή των σύνθετων υλικών τύπου σάντουιτς σε εφαρμογές αεροναυπηγικής. Η ανάφλεξη των σύνθετων σάντουιτς μπορεί να είναι μια πολύπλοκη διαδικασία εξαιτίας της επιρροής το υλικού που χρησιμοποιείται στο πυρήνα. Το Σχήμα 3.33 εμφανίζει την επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στον χρόνο ανάφλεξης δυο υλικών σύνθετων σάντουιτς. Παρατηρείται ότι το υλικό με πυρήνα ξύλου balsa και εξωτερικής επίστρωσης πλαστικού ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GPR), εμφανίζει μια γραμμική σχέση μεταξύ του χρόνου ανάφλεξης και της θερμικής ροής, και αυτή η γραμμική συμπεριφορά εμφανίζεται και στα ελάσματα μονής επίστρωσης (σύμφωνα με το Σχήμα 3.32). Ενώ το σύνθετο με πυρήνα πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και εξωτερική επίστρωση GPR δεν εμφανίζει τον ίδιο γραμμικό χαρακτήρα σε υψηλές θερμικές ροές. Επιπλέον, ο χρόνος ανάφλεξης για αυτό το υλικό είναι αξιοσημείωτα μικρότερος για θερμικές ροές κάτω των 50 kW/m^2 . Αυτό οφείλεται στην επιρροή του PVC πυρήνα στη διαδικασία ανάφλεξης, αφού όταν το υλικό εκτεθεί σε φωτιά ο πυρήνας του λιώνει και διασπάται με αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα μεταξύ του πυρήνα και της επίστρωσης. Αυτό το κενό αέρα μειώνει το ρυθμό της θερμικής αγωγιμότητας μέσω της επίστρωσης με αποτέλεσμα να θερμαίνεται και να αναφλέγεται πιο γρήγορα. Στη περίπτωση του σύνθετου σάντουιτς με πυρήνα balsa, η θερμική μεταφορά δεν διακόπτεται αφού ο πυρήνας μένει σε επαφή με την επίστρωση με αποτέλεσμα μεγαλύτερους χρόνους ανάφλεξης. Γενικότερα τα υλικά, που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες, με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα όπως ο πολυμερής αφρός πολυμερή με κυψελίδες μπορούν να μειώσουν περισσότερο το χρόνο ανάφλεξης.



Σχήμα 3.33: Επίδραση της θερμικής ροής στο χρόνο ανάφλεξης δυο σύνθετων υλικών σάντουιτς (Grenier A.T. et al, 1998).

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στις ιδιότητες ανάφλεξης των πολυμερών σύνθετων υλικών είναι το περιβάλλον που εξελίσσεται η φωτιά. Οι περισσότερες μελέτες ανάφλεξης πραγματοποιούνται κάτω από ατμοσφαιρικές συνθήκες (π.χ. 21%O₂/78%N₂), ωστόσο η ατμόσφαιρα σε μερικές φωτιές μπορεί να είναι ουσιαστικά διαφορετική. Για παράδειγμα όταν μια φωτιά εξελίσσεται σε ένα κλειστό χώρο χωρίς αερισμό, το ποσοστό του οξυγόνου πέφτει με τη πάροδο του χρόνου φτάνοντας ακόμη και τα επίπεδα της τάξεως των 10% προτού οι φλόγες κατασβηστούν από την έλλειψη οξυγόνου.

Σύμφωνα με έρευνες (Lyon R.E. et al, 2005), έδειξαν ότι η ανάφλεξη θα πραγματοποιηθεί όταν υπάρξει τόση θερμική ενέργεια στην επιφάνεια του πολυμερούς ώστε να τη μετατρέψει από στερεή καύσιμη ύλη σε αέρια. Αυτή η θερμότητα αεριοποίησης ανά μονάδα μάζας στερεάς πολυμερούς ύλης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη σχέση :

$$h_g = c(T_{ign} - T_0) + (1 + m) \cdot h_n \quad (3.29)$$

όπου: T_{ign} θερμοκρασία ανάφλεξης
 T_0 θερμοκρασία περιβάλλοντος
 h_n θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση των διασπώμενων αερίων
 m λόγος της μάζας των άκαυστων υλικών στο πολυμερές, όπως οι ίνες ενίσχυση κλπ.
 $c = c_0 T / T_0$ θερμοχωρητικότητα
 c_0 θερμοχωρητικότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

Επομένως βασισμένοι πάνω σε αυτή την ανάλυση, η θερμότητα αεριοποίησης σχετίζεται με τη θερμοκρασία ανάφλεξης ενός πολυμερούς μέσω της μαθηματικής έκφρασης:

$$h_g = \int_{T_0}^{T_{ign}} c(T) dT + (1 - m) h_n = \frac{c_0 T_{ign}^2}{2T_0} + \left[(1 - m) h_n - \frac{c_0 T_0}{2} \right] \cong \frac{c_0 T_{ign}^2}{2T_0} \quad (3.30)$$

ή

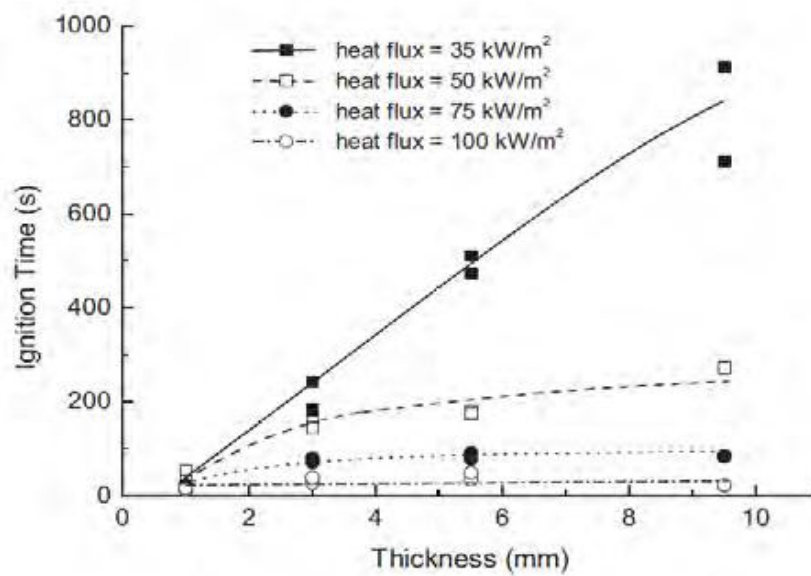
$$T_{ign} \cong \left[\frac{T_0 h_g}{c_0} \right]^{1/2} \quad (3.31)$$

Αν οι τιμές των h_g και c_0 είναι γνωστές για ένα πολυμερές, τότε είναι εύκολο να εκτιμηθεί η θερμοκρασία ανάφλεξής του.

Τελευταία αλλά όχι ασήμαντη, θεωρείται η επιρροή του πάχους του πολυμερούς στο χρόνο ανάφλεξης (Hume J. et al, 1992), (Scudamore M.J. et al, 1994), (Kootsookos A. et al, 2005). Το Σχήμα 3.34 παρουσιάζει την επίδραση του πάχους του δοκιμίου στο χρόνο ανάφλεξης για ελάσματα γυαλιού/φαινολών δοκιμασμένες σε διάφορες θερμικές ροές. Παρατηρείται ότι στα $35 kW/m^2$ ο χρόνος ανάφλεξης αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση του πάχους. Ωστόσο σε υψηλότερες θερμικές ροές, ο χρόνος ανάφλεξης σταδιακά αυξάνεται για τιμές πάχους μέχρι και τα $3mm$, ενώ πάνω από αυτή τη τιμή ο χρόνος γίνεται σχεδόν ανεξάρτητος με το πάχος. Σύμφωνα με την αναφορά (Hume J. et al, 1992), η αύξηση του χρόνου ανάφλεξης με το πάχος οφείλεται στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Τα υλικά ταξινομούνται ανάλογα με το θερμικό τους πάχος, με αυτό τον τρόπο ένα υλικό θεωρείται 'θερμικά λεπτό' όταν η θερμότητα από τη φωτιά απορροφάται τόσο γρήγορα ώστε δεν υπάρχει κάποιο σημαντικό θερμοκρασιακό βαθμωτό στο υλικό, ενώ στα 'θερμικά παχιά' υλικά υπάρχει ένα θερμοκρασιακό βαθμωτό. Η αναφορά (Mikkola E. et al, 1989) προτείνει ότι το θερμικό πάχος του υλικού μπορεί να προσδιοριστεί από το χαρακτηριστικό μήκος της θερμικής αγωγιμότητάς του (Δ), η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

$$\Delta = \sqrt{a \cdot t_i} = \sqrt{\frac{k \cdot t_i}{r \cdot c}} \quad (2.32)$$

όπου: a θερμική διάχυση
 t_i χρόνος ανάφλεξης
 k θερμική αγωγιμότητα
 r πυκνότητα υλικού
 c ειδική θερμότητα



Σχήμα 3.34: Επίδραση του πάχους του δοκιμίου στο χρόνο ανάφλεξης σε ελάσματα γυαλιού/φαινολών δοκιμασμένες σε διάφορες θερμικές ροές (Scudamore M.J. et al, 1994).

Όταν το χαρακτηριστικό μήκος της θερμικής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερο από το πάχος του δείγματος, L_o , τότε θεωρείται θερμικά λεπτό. Στη πράξη, αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα σύνθετα υλικά είναι θερμικά λεπτά όταν το πάχος τους είναι μικρότερο από $2mm$. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ο χρόνος ανάφλεξης ενός ομογενούς υλικού μπορεί να προσδιοριστεί ως :

$$t_i = r \cdot c \cdot L_o \frac{(T_i - T_o)}{q_{net}} \quad (3.34)$$

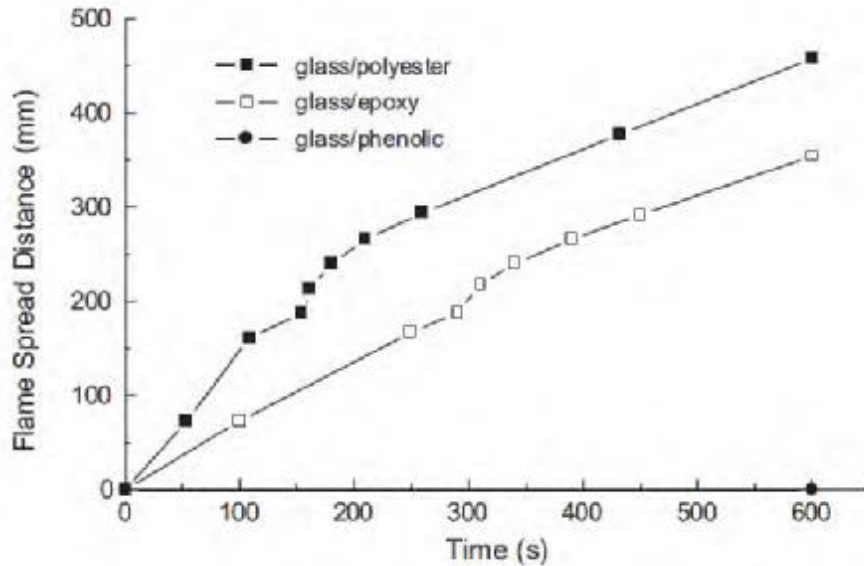
όπου: T_i θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού την ώρα της ανάφλεξης
 T_o θερμοκρασία περιβάλλοντος
 q_{net} προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία στην επιφάνεια του υλικού (συμπεριλαμβανομένων και των θερμικών απωλειών)

Η εξίσωση (3.34) μας δείχνει ότι ο χρόνος ανάφλεξης ενός θερμικά λεπτού υλικού μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας. Η γραφική παράσταση του χρόνου ανάφλεξης ως προς τη προσπίπτουσα ακτινοβολία δίνει καμπύλη με κλίση -2 για θερμικά λεπτά υλικά. Η επαλήθευση της μαθηματικής εξίσωσης επιτυγχάνεται μέσω του Σχήματος 3.32 όπου οι καμπύλες των σύνθετων υλικών με ίνες γυαλιού παρουσιάζουν κλίση (m) περίπου -2.

- *Surface flame spread*

Ένας σημαντικός συντελεστής που περιγράφει την ανάπτυξη και τη διάδοση της φωτιάς είναι η ταχύτητα με την οποία οι φλόγες διαδίδονται πάνω στην επιφάνεια των εύφλεκτων υλικών (Quintiere J.G. et al. 2000). Εξαιτίας της υψηλής ευφλεκτότητας πολλών υλικών, οι φλόγες θα διαδίδονται πολύ γρήγορα επάνω στο υλικό με αποτέλεσμα τη δυσκολία στη κατάσβεση της φωτιάς. Η διάδοση της φωτιάς σε ένα σύνθετο υλικό μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας πειραματικές τεχνικές. Η πιο κοινή τεχνική είναι η έκθεση ενός σύνθετου υλικού τοποθετημένο υπο γωνία 45° σε ένα θερμαντικό πάνελ σταθερής θερμικής ροής. Το πάνελ τοποθετείται στο πάνω μέρος του υλικού προκειμένου να εξαναγκάσουμε τη φωτιά να εξαπλωθεί από το άνω μέρος του υλικού μέχρι το κάτω και μετράται η ταχύτητα διέλευσης της φωτιάς.

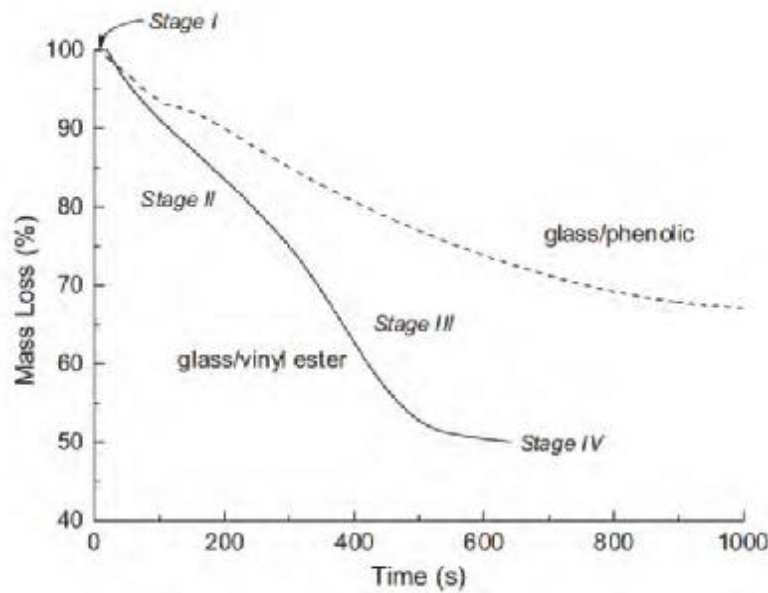
Στο Σχήμα 3.35, παρουσιάζεται η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας για διάφορα ελάσματα πολυεστέρα, εποξικά και φαινόλων. Παρατηρείται ότι οι φλόγες διαδίδονται πολύ γρήγορα στα υλικά πολυεστέρα και εποξικά και αυτό οφείλεται στην υψηλή ευφλεκτότητα των υλικών. Ωστόσο η φλόγα δεν διαδίδεται στο υλικό από φαινόλη, πράγμα που καθιστά το υλικό ικανό να κατασβηστεί μόνο του τη φωτιά. Γι' αυτό το λόγο τα συγκεκριμένα υλικά προτιμώνται σε πολλές εφαρμογές όπου υπάρχει υψηλό ποσοστό εμφάνισης πυρκαγιάς.



Σχήμα 3.35: Διάδοση της φλόγας συναρτήσει του χρόνου (Gibson A.G. et al, 1995).

- *Mass loss*

Η απώλεια μάζας είναι μία ποσοτική μέτρηση του υλικού που θα διασπαστεί στη φωτιά. Μέσω της μεθόδου μέτρησης που παρέχει το καλορίμετρο κώνου μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό και ο ρυθμός της διάσπασης των οργανικών συνιστωσών που αποτελούν ένα σύνθετο υλικό. Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της απώλειας μάζας δυο σύνθετων υλικών κατά τη διάρκεια του χρόνου, ακτινοβολούμενα υπο σταθερή θερμική ροή των $50kW/m^2$. Οι καμπύλες της απώλειας μάζας παρουσιάζουν κάποιες περιοχές, όπου η κάθε μια αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό φαινόμενο που συμβαίνει κατά τη καύση του υλικού και αυτές αριθμούνται από I έως IV. Το στάδιο I, αντιπροσωπεύει μια μικρή περίοδο όπου δεν εμφανίζεται κάποια μεταβολή στο βάρος του υλικού όταν αυτό έχει εκτεθεί για πρώτη φορά στη φωτιά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μήτρα του πολυμερούς δεν έχει φτάσει στη θερμοκρασία αποσύνθεσης. Το στάδιο II, χαρακτηρίζεται από ταχεία απώλεια μάζας στη πάροδο του χρόνου, αφού σε αυτή τη φάση έχει ξεκινήσει η ενδοθερμική διάσπαση της μήτρας του σύνθετου υλικού. Κατά τη διάρκεια του σταδίου III, ο ρυθμός απώλειας μάζας μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας της υποβάθμισης της μήτρας του πολυμερούς παρότι μια μικρή περιοχή του υλικού παραμένει άθικτη από τη φωτιά. Σε αυτή τη φάση, το υλικό συμπεριφέρεται ως ένα θερμικά λεπτό υλικό, γεγονός που επιταχύνει το ρυθμό απώλειας μάζας. Στο στάδιο IV, η καμπύλη της απώλειας μάζας φτάνει στη χαμηλότερη τιμή της, αφού πλέον η μήτρα του πολυμερούς έχει καταναλωθεί, αντιπροσωπεύοντας την τελική απώλεια μάζας του υποβαθμισμένου ελάσματος.

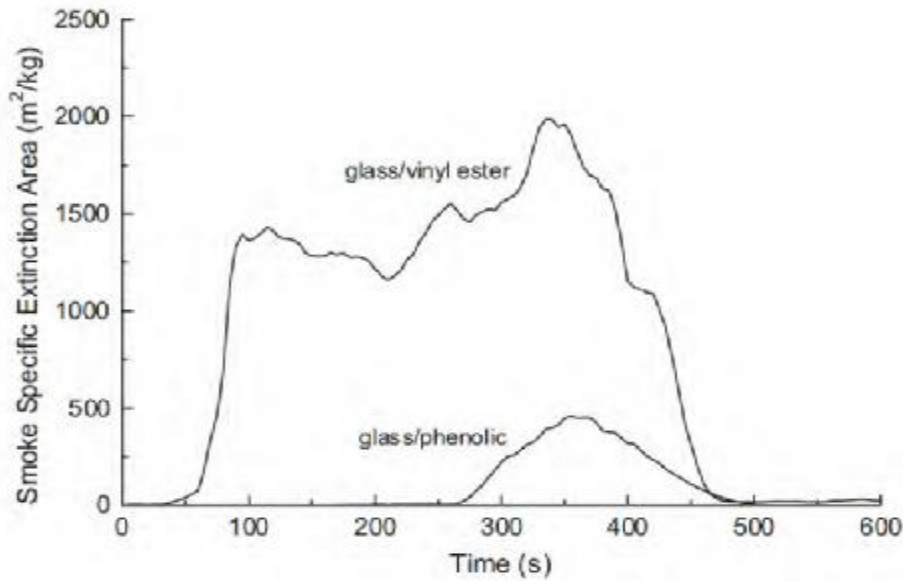


Σχήμα 3.36: Τυπικές καμπύλες απώλειας μάζας για σύνθετα υλικά γυαλιού/βινυλεστέρα και γυαλιού/φαινολικών ρητινών.

- *Smoke density*

Η παραγωγή πυκνού καπνού των πολυμερών σύνθετων υλικών, αποτελεί μια από τις βασικότερες ανησυχίες σε θέματα ασφαλείας των κατασκευαστικών εταιριών. Ο καπνός που παράγεται από ένα φλεγόμενο σύνθετο υλικό αποτελείται από μίγμα θραυσμάτων ινών και πολύ μικρών σωματιδίων άνθρακα. Η έκθεση των ανθρώπων στα καπναέρια της καύσης δεν θεωρείται επιβλαβής, ωστόσο ο καπνός μπορεί να είναι αρκετά πυκνός με αποτέλεσμα να καθιστά τη κατάσβεση της φωτιάς αρκετά δύσκολη.

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι ο παραγόμενος καπνός από εύφλεκτα σύνθετα υλικά όπως, ο πολυεστέρας ο βινυλεστέρας και οι εποξικές ρητίνες, είναι πολύ πυκνότερος από το καπνό που παράγεται από τις φαινολικές ρητίνες (Gibson A.G. et al, 1995), (Brown J.R. et al, 1997), (Allison D.M. et al, 1991). Σύμφωνα με το Σχήμα 3.37, επιτυγχάνεται η σύγκριση του συντελεστή SEA (Specific Extinction Area) για διάφορα σύνθετα υλικά όπως γυαλιού/βινυλεστέρα και γυαλιού/φαινολών όταν αυτά εκτεθούν σε φωτιά. Ο δείκτης SEA είναι μια μέτρηση ποσοτικοποίησης του ποσού αυτών των καπναερίων που απελευθερώνονται από μια μάζα και μετατρέπονται σε καπνό. Ο δείκτης SEA του βινυλεστέρα αυξάνεται ταχύτατα κατά τη καύση του, παραμένοντας υψηλός μέχρι η μήτρα του πολυμερούς να καταναλωθεί εντελώς γύρω στα 500sec. Ενώ τα σύνθετα φαινολών παράγουν πολύ λιγότερο καπνό, γεγονός που τα καθιστά τα ιδανικότερα υλικά σε κατασκευές με υψηλό ποσοστό εμφάνισης φωτιάς.



Σχήμα 3.37: Παραγωγή καπνού συναρτήσεως του χρόνου για δυο σύνθετα υλικά ακτινοβολούμενα υπο σταθερή θερμική ροή των $50kW/m^2$ (Mouritz A.P. et al, 2006).

- *Smoke toxicity*

Στη μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών σε πυρκαγιά, η κυριότερη μεταβλητή της είναι ο ρυθμός θερμικής απελευθέρωσης (HRR), ωστόσο σημαντικός παράγοντας είναι η τοξικότητα των αερίων που απελευθερώνονται από τη καύση των σύνθετων υλικών. Πολλές φορές η τοξικότητα των αερίων έχει οδηγήσει σε θάνατο αρκετά άτομα, πράγμα που τη καθιστά μια σοβαρή ιδιότητα που απαιτεί μεγάλη προσοχή για όλες τις κατασκευαστικές εταιρίες. Το ποσοστό μονοξειδίου του άνθρακα που παράγεται από τη καύση των σύνθετων υλικών εξαρτάται από τη σύνθεση των οργανικών συστατικών του σύνθετου υλικού, τη θερμοκρασία της φωτιάς, τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου, ωστόσο ακόμη και χαμηλότερες τιμές μονοξειδίου του άνθρακα μπορεί να προκαλέσει το θάνατο (Hirschler M.M. et al, 1987). Όταν η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα φτάσει περίπου στα $1500ppm$ (*parts per million*) τότε σε μια ώρα μπορεί να επιφέρει τον θάνατο, ενώ στον ίδιο χρόνο η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να φτάσει στα $100.000ppm$ για να προκαλέσει το θάνατο. Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 3.6 ο οποίος παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις των εκπεμπόμενων αερίων από τη καύση διάφορων υλικών.

Πίνακας 3.6: Πίνακας συγκεντρώσεων αερίων από τη καύση των παρακάτω υλικών (Sastri S.B. et al, 1997),(Sorathia U. et al, 1991).

Composite	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	HCN (ppm)	HCl (ppm)
Glass/vinyl ester	230	0,3	not detected	not detected
Glass/epoxy	283	1,5	5	not detected
Glass/BMI	300	0,1	7	trace
Glass/phenolic	300	1,0	1	1
Glass/polyimide	200	1,0	trace	2
Glass/PPS	70	0,5	2	0,5
Glass/phthalonitrile	40	-	-	-
Glass/PEEK	trace	trace	not detected	not detected

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

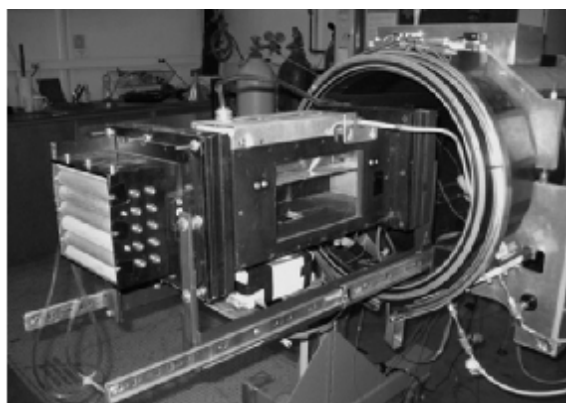
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

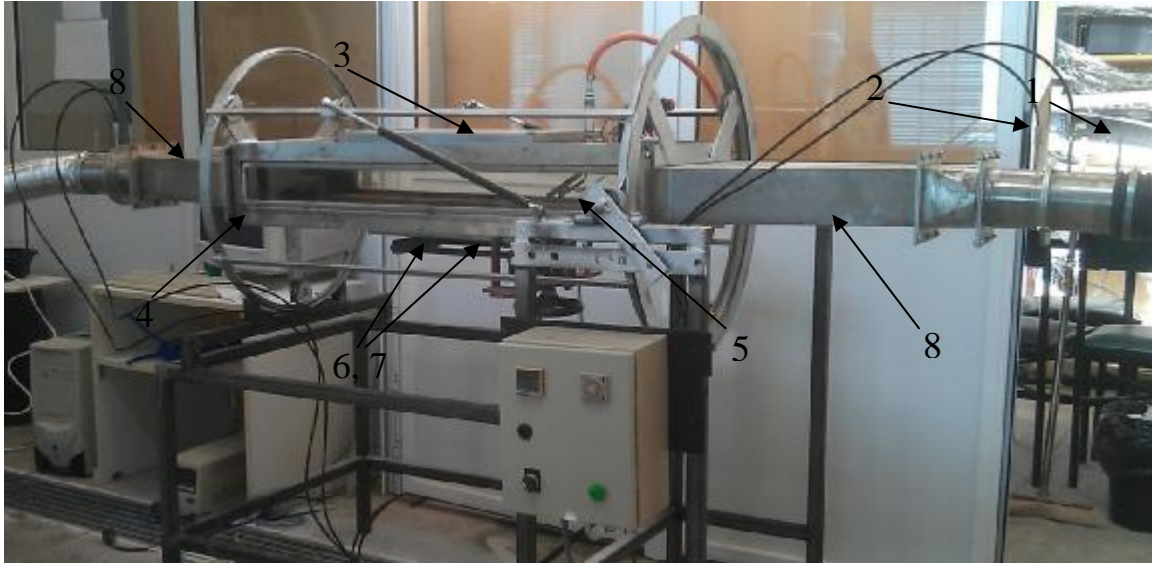
Η πειραματική συσκευή κατασκευάστηκε με σκοπό την προσομοίωση των κρυφών περιοχών ενός αεροσκάφους για τη μελέτη των μηχανισμών που διέπουν την ανάφλεξη και την εξάπλωση της φωτιάς καθώς και τον περιορισμό της εξάπλωσής της, με χρήση σύνθετων υλικών. Για τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης έπρεπε να ανατρέξουμε σε υπάρχουσες κατασκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη υλικών σε φωτιά. Από τη μια πλευρά υπάρχει η διάταξη RHP (Radiant Heat Panel) η οποία αποτελείται από ένα θερμοπομπό ο οποίος ακτινοβολεί το εκάστοτε υπο δοκιμή υλικό το οποίο είναι τοποθετημένο υπο κλίση με σκοπό την έναρξη και εξάπλωση φωτιάς επάνω στο υλικό υπο ατμοσφαιρικές συνθήκες, *Εικόνα 4.1a*. Ωστόσο από την άλλη πλευρά, υπάρχουν συσκευές για τη συμπεριφορά των υλικών σε φωτιά υπο μη ατμοσφαιρικές συνθήκες. Προκειμένου να κατανοηθούν οι φυσικοί μηχανισμοί που ευθύνονται για την ανάφλεξη των υλικών σε μη ατμοσφαιρικές συνθήκες και ειδικότερα σε περιβάλλοντα χαμηλής πίεσης, διεξήχθησαν πειράματα ελεγχόμενης ανάφλεξης σε ένα σύστημα το οποίο είναι κλεισμένο μέσα σε ένα κέλυφος που παρέχει στο χειριστή της διάταξης τον έλεγχο του περιβάλλοντος εντός του. Η διάταξη ονομάζεται Forced-flow Ignition and Flame Spread Test (FIST) και αποτελείται από έναν αεραγωγό μέσα στον οποίο ακτινοβολείται το δείγμα και πραγματοποιείται η καύση του υλικού υπο διάφορες συνθήκες πίεσης, *Εικόνα 4.1b*. Η κύρια ιδέα στην κατασκευή της πειραματικής συσκευής βασίστηκε στη πρότυπη διάταξη (FIST) πάνω στην οποία προστέθηκαν τα επιμέρους στοιχεία τα οποία διαμόρφωσαν τη πειραματική συσκευή ως μια κρυφή περιοχή κατάλληλα διαμορφωμένη για τη καταγραφή των απαραίτητων θερμικών μεγεθών, και παρουσιάζεται στο *Εικόνα 4.2*.



Εικόνα 4.1a: Πειραματική διάταξη Radiant Heat Panel



Εικόνα 4.1b: Πειραματική διάταξη FIST



Εικόνα 4.2: Πειραματική διάταξη προσομοίωσης απρόσιτων περιοχών.

Πίνακας 4.1: Αντιστοίχιση αριθμημένων σημείων με τα μέρη της πειραματικής συσκευής.

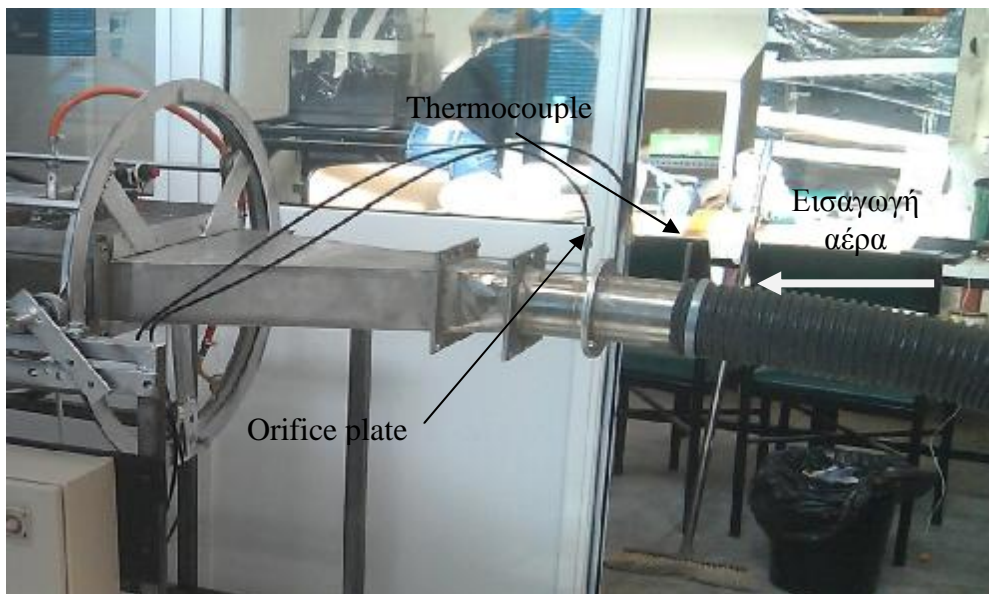
Σημείο 1	Θερμοζεύγος (Thermocouple)
Σημείο 2	Μετρητής παροχής (Orifice Plate)
Σημείο 3	Θερμοπομπός ακτινοβολίας (Flat Face Panel)
Σημείο 4	Πυρίμαχα μονωτικά υλικά
Σημείο 5	Φλόγιστρο (Burner)
Σημείο 6	Θέση δοκιμίου
Σημείο 7	Θερμοζεύγη (κάτω επιφάνεια δοκιμίου)
Σημείο 8	Ακροφύσια εισόδου και εξόδου

Μια μεγάλη ποικιλία διάφορων τύπων πολυμερών σύνθετων υλικών χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία, και διακρίνονται σε θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά. Διάφοροι τύποι πολυμερών σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία διακρίνονται σε θερμοσκληρυνόμενα και θερμοπλαστικά. Στη κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων υλικών κυριαρχούν οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι πολυεστέρες και βινυλεστέρες, οι φαινολικές και εποξειδικές ρητίνες καταλήγοντας στους υψηλής θερμοκρασίας κυανεστέρες. Εν συνέχεια, στη δεύτερη κατηγορία των θερμοπλαστικών κυριαρχούν, το πολυπροπυλένιο PP, Polyetherether-ketone PEEK και polyphenylenesulphide PPS.

Η συμπεριφορά των σύνθετων πολυμερών υλικών σε συνθήκες φωτιάς περιγράφονται από κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται για την ποιοτική και την ποσοτική σύγκριση των διάφορων υποψήφιων αεροπορικών υλικών. Συγκεκριμένα τα μεγέθη αυτά είναι : Heat Release Rate HRR, Thermal Stability Index TSI, Limited Oxygen Index LOI, Extinction Flammability Index EFI, Time to ignition, Surface flame Spread, Mass loss, Smoke Density, Smoke Toxicity. Οι διαδικασίες ελέγχου και τα υπολογιζόμενα μεγέθη γίνονται βάσει διεθνών προτύπων που κυρίως για τον τομέα της αεροναυπηγικής ορίζονται από την Ομοσπονδία Διεύθυνσης Αεροπλοΐας, FAA.

4.2 ΚΑΝΑΛΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ

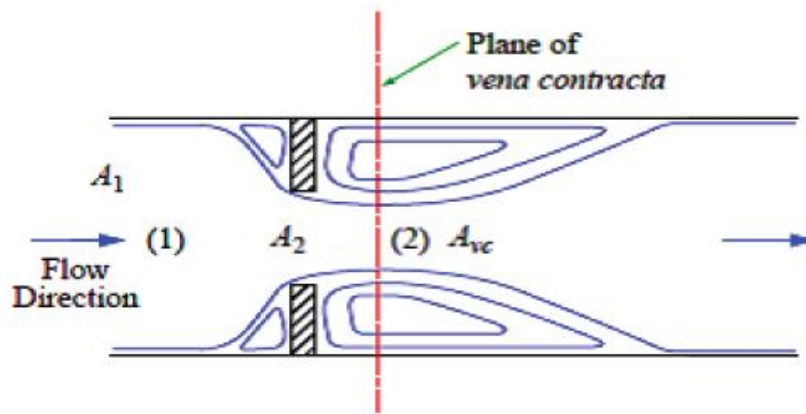
Το κανάλι εισαγωγής σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχονται οι συνθήκες εισόδου του πειράματος. Αρχικά το κανάλι εισαγωγής είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου 100mm , το οποίο φέρει έναν μετρητή διαφράγματος τύπου orifice plate ο οποίος θα μετρά έμμεσα τη παροχή του ρευστού. Στο άνω μέρος του αγωγού προβάλλουν τρεις οπές, όπου η κάθε μια εξυπηρετεί και ένα διαφορετικό σκοπό, Εικόνα 4.3. Στη πρώτη οπή συνδέεται ένας θερμοκρασιακός μετρητής thermocouple τύπου K, ο οποίος θα καταγράφει τη θερμοκρασιακή τιμή του ρευστού με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της πυκνότητας και του ιξώδους του ρευστού για τον έμμεσο προσδιορισμό της παροχής του ρευστού. Στην δεύτερη οπή συνδέεται ο ένας εκ των δυο σωλήνων μέτρησης του διαφορικού μετρητή πίεσης όπου από το συγκεκριμένο σημείο λαμβάνεται η πίεση της ανάντη πλευράς του μετρητή (upstream), ενώ στην τρίτη και τελευταία οπή συνδέεται ο δεύτερος σωλήνας μέτρησης του μετρητή πίεσης από το οποίο λαμβάνεται η πίεση στη κατάντη πλευρά του μετρητή διαφράγματος (downstream).



Εικόνα 4.3: Οπές μέτρησης στον αγωγό εισαγωγής του αέρα

4.2.1 Μέτρηση παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής του ρευστού θα χρησιμοποιηθεί ένας μετρητής διαφράγματος τύπου orifice plate, αφού πρόκειται για έναν μετρητή με χαμηλό κόστος εγκατάστασης, ευρύ φάσμα μετρήσεων χαμηλό κόστος συντήρησης καθώς και χαμηλό κόστος απόκτησης. Η αρχή λειτουργίας του μετρητή διαφράγματος είναι η πτώση πίεσης που εμφανίζει το ρευστό μεταξύ ανάντη και κατόντη πλευράς του. Καθώς το ρευστό φτάνει με ανεπτυγμένο προφίλ ταχύτητας στη συσκευή τότε η διατομή της δέσμης του ρευστού συστέλλεται απότομα και στη συνέχεια η δέσμη παίρνει την τελική ελάχιστη διατομή, που ονομάζεται διατομή πλήρους συστολής (vena contracta). Έπειτα η ροή αναπτύσσεται λαμβάνοντας πάλι το αρχικό της προφίλ. Οι πιεζομετρικές οπές μέτρησης της διαφορικής πίεσης τοποθετούνται, η μεν πίεση P_1 στο σημείο όπου η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη ενώ η δε πίεση P_2 στο σημείο της vena contracta, Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Σημεία λήψης πιεζομετρικών τιμών, ανάντης πλευράς (Σημείο 1), vena contracta (Σημείο 2) (M.R. Chowdhury, 2010).

4.2.1.1 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μετρητή διαφράγματος

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός μετρητή διαφράγματος είναι η διάμετρος του αγωγού D_1 , η διάμετρος του μετρητή D_2 , καθώς και ο λόγος των διαμέτρων $b = \frac{D_2}{D_1}$. Τα όρια λειτουργίας του μετρητή ορίζονται από το ISO 5167 ανάλογα βέβαια από τη μέθοδο λήψης της πίεσης (pressure taps), που στη περίπτωση μας χρησιμοποιείται η μέθοδος flange tapping, με τις κρίσιμες τιμές τους να διαμορφώνονται ως εξής:

Πίνακας 4.2: Όρια λειτουργίας του μετρητή διαφράγματος με τη μέθοδο Flange tapping

ΟΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΡΗΤΗ
$D_2 \geq 12,5mm$
$50mm \leq D_1 \leq 1000mm$
$0,1 \leq b \leq 0,75$
$Re_{D_2} \geq 5000$ ή $Re_{D_2} \geq 170 \cdot b^2 \cdot D_2$

Για τον προσδιορισμό των απαραίτητων χαρακτηριστικών του μετρητή, θα δημιουργήσουμε ζεύγη τιμών (D_1, D_2) και για κάθε ζεύγος θα υπολογίσουμε τα αντίστοιχα μεγέθη της ροής όπως η ογκομετρική παροχή του ρευστού Q , ο συντελεστής ροής C , ο συντελεστής διαστολής e , ο αριθμός Reynolds στο μετρητή Re_{D_2} , η ταχύτητα στον αγωγό u_u , και η ταχύτητα στο θάλαμο καύσης u_{hf} , για κάθε μεταβολή της διαφορικής πίεσης DP . Ωστόσο υπάρχει ένα υπολογιστικό πρόβλημα στον υπολογισμό των παραπάνω τιμών και αυτό το πρόβλημα εμφανίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή ροής C . Ο συντελεστής ροής C είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds, όπου με τη σειρά του ο αριθμός Reynolds είναι συνάρτηση της άγνωστης παροχής Q του ρευστού. Επομένως, ο συντελεστής ροής C δε μπορεί να υπολογιστεί άμεσα γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια επαναληπτική διαδικασία προκειμένου να βρεθούν οι ακριβείς τιμές του συντελεστή ροής C καθώς και του αριθμού Reynolds.

Για να επιτευχθούν όλα τα παραπάνω πρέπει να δημιουργηθεί μια επαναληπτική διαδικασία, όπως ορίζει το ISO 5167, η οποία αρχικά θα δέχεται τις γνωστές μεταβλητές και σύμφωνα με αυτές θα υπολογίζει τις αντίστοιχες επιθυμητές. Ωστόσο για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της τιμής του συντελεστή ροής C , θα εισαχθεί μια αυθαίρετη τιμή για τον αριθμό Re_{as} προκειμένου να εκτιμηθεί η παροχή Q . Έπειτα με την υπολογισμένη τιμή της παροχής Q θα υπολογίζεται εκ νέου ο αριθμός Re_{cal} όπου θα συγκρίνεται η τιμή του με αυτή της αρχικής εκτίμησης του αριθμού Re_{as} . Εάν αυτές οι δυο τιμές του αριθμού Reynolds (εκτιμώμενης Re_{as} και υπολογισμένης Re_{cal}) ταυτιστούν ($Re_{as} = Re_{cal}$) τότε θα τυπωθούν όλες οι τιμές των απαιτούμενων τιμών που αναφέρθηκαν στη παραπάνω παράγραφο, με τον υπολογισμό των επόμενων τιμών να συνεχίζεται με την τιμή της διαφορικής πίεσης να αυξάνεται κατά μια μονάδα. Στη περίπτωση όμως, που οι τιμές της εκτιμώμενης τιμής του αριθμού Re_{as} και της υπολογισμένης τιμής του Re_{cal} δεν συμπίπτουν τότε θα θεωρείται η υπολογιζόμενη τιμή Re_{cal} ως η νέα εκτιμώμενη τιμή του Re_{as} προχωρώντας ωστόσο τους υπολογισμούς μέχρι να υπάρξει ταύτιση των δυο τιμών. Η λογική των υπολογισμών παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.3a και Πίνακα 4.3b στη συνέχεια.

Πίνακας 4.3α.: Γνωστές μεταβλητές

INPUTS		
Units	Symbols	Calculation Formula
Pipe diameter, [m]	D_1	Γνωστή από τον επαναληπτικό έλεγχο
Orifice diameter, [m]	D_2	Γνωστή από τον επαναληπτικό έλεγχο
Measured differential pressure, [kPa]	DP	Μετρητής διαφορικής πίεσης
Upstream pressure, [Pa]	P_1	Μετρητής διαφορικής πίεσης
Fluid temperature, [°C]	T	Μετρητής thermocouple
Fluid density, [kg/m ³]	ρ	$\rho(T) = 1,29231 - 0,00473 \cdot T + 0,0000170486 T^2 - 0,000000053202 \cdot T^3 + 0,000000000115419 \cdot T^4 - 0,0000000000011218 \cdot T^5$
Fluid viscosity, [Pas]	μ	$\mu(T) = 0,001 \cdot \left(0,01827 \cdot \left(\frac{(0,555 \cdot 524,07 + 120)}{\left((0,555 \cdot (T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} + 120 \right)} \right) \right) \cdot \left(\frac{\left((T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} \right)}{(524,07^{1,5})} \right) \right)$
Isentropic expansion	k	Γνωστό από το ρευστό που χρησιμοποιείται
Hidden zone fire apparatus, [m ²]	A_{hzf}	Γνωστό εμβαδό από τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης
Upstream tap location, [m]	L_1	Γνωστό από ISO 5167
Downstream tap location, [m]	L_2	Γνωστό από ISO 5167
Reynolds number	Re_{as}	Εκτιμώμενη τιμή

Πίνακας 4.3b. : Τύποι υπολογισμών

OUTPUTS		
Units	Symbols	Calculation Formula
Orifice plate area, $[m^2]$	A_2	$A_2 = \frac{p \cdot D_2^2}{4}$
Inlet pipe area, $[m^2]$	A_1	$A_1 = \frac{p \cdot D_1^2}{4}$
Diameter ratio	b	$b = \frac{D_2}{D_1}$
Discharge coefficient	C	$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot b^2 - 0,216 \cdot b^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot b}{Re_{D_2}} \right)^{0,7} +$ $+ \left(0,0188 + 0,0063 \cdot \left[\left(\frac{19000b}{Re_{D_2}} \right)^{0,8} \right] \right) \cdot b^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{D_2}} \right)^{0,3}$ $+ (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10L_1} - 0,123 \cdot e^{-7L_1}) \cdot \left(1 - 0,11 \cdot \left(\frac{19000b}{Re_{D_2}} \right)^{0,8} \right) \cdot \frac{b^4}{1 - b^4}$ $- 0,031 \cdot \left(\frac{2 \cdot L_2}{1 - b} - 0,8 \cdot \left(\frac{2 \cdot L_2}{1 - b} \right)^{1,1} \right) b^{1,3}$
Expansion coefficient	e	$e = 1 - \frac{(0,41 + 0,35 \cdot b^4) \cdot DP}{k \cdot P_1}$
Flow rate, $\left[\frac{m}{sec^3} \right]$	Q	$Q = e \cdot C \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - b^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot DP}{r}}$
Flow velocity through hidden zone fire apparatus, $\left[\frac{m}{sec} \right]$	u_{hzf}	$u_{hzf} = \frac{Q}{A_{hzf}}$
Flow velocity through inlet pipe, $\left[\frac{m}{sec} \right]$	u_u	$u_u = \frac{Q}{A_1}$

<p>Flow velocity through orifice plate, $\left[\frac{m}{sec} \right]$</p>	<p>$u_{orifice}$</p>	$u_{orifice} = \frac{Q}{A_2}$
<p>Reynolds number</p>	<p>Re_{cal}</p>	$Re_{cal} = \frac{D_2 \cdot u_{orifice} \cdot r}{m}$

Σε κάθε έλεγχο που θα ολοκληρώνεται τα ζεύγη των τιμών των διαμέτρων του εκάστοτε μετρητή θα αλλάζουν. Ωστόσο γνώμονας στην επιλογή των ζευγών είναι η αναζήτηση στην αγορά για τυποποιημένα μεγέθη μετρητών ώστε μέσω των υπολογισμών των επιμέρους στοιχείων που χαρακτηρίζουν τη ροή να επιλέγουν οι κατάλληλοι διάμετροι. Οι διάμετροι που προκύπτουν και θα μελετηθούν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Πίνακα 4.4 :

Πίνακας 4.4: Ζεύγη διαθέσιμων διαμέτρων μετρητών διαφράγματος

ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ			
Διάμετρος Αγωγού	Διάμετρος Μετρητή	Διάμετρος Αγωγού	Διάμετρος Μετρητή
D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_1 [mm]	D_2 [mm]
60	15	80	40
60	20	80	45
60	25	80	50
60	30	90	15
60	35	90	20
60	40	90	25
60	45	90	30
70	15	90	35
70	20	90	40
70	25	90	45
70	30	90	50
70	35	100	15
70	40	100	20
70	45	100	25
70	50	100	30
80	15	100	35
80	20	100	40
80	25	100	45
80	30	100	50
80	35	100	57

Οι υπολογισμοί θα ολοκληρώνονται όταν η παροχή του ρευστού φτάσει στη κρίσιμη τιμή των $Q_{\max} = 0,024 \frac{m^3}{\text{sec}}$. Πρόκειται για μια κρίσιμη τιμή που επιβάλλει ο κατασκευαστής του καλορίμετρου κώνου αφού αυτή η τιμή προβλέπεται στα όρια λειτουργίας του. Έχοντας υπολογίσει τα αποτελέσματα για κάθε ζεύγος μετρητή ακολουθεί η επιλογή των κατάλληλων διαμέτρων. Γνώμονας στην επιλογή μας είναι το εύρος των τιμών της διαφορικής πίεσης μέχρι να επιτευχθεί παροχή ίση με την $Q_{\max} = 0,024 \frac{m^3}{\text{sec}}$, αφού πολύ μεγάλες τιμές διαφορικής πίεσης απαιτούν κατάλληλο μετρητή διαφορικής πίεσης ο οποίος θα μπορεί να 'αισθανθεί' τα επιθυμητά υψηλά εύρη γεγονός όμως που ανεβάζει κατακόρυφα το κόστος απόκτησης του μετρητή διαφορικής πίεσης σε απαγορευτικά επίπεδα. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα ζεύγη διαμέτρων αντιστοιχισμένα με τις μέγιστες τιμές διαφορικής πίεσης που δίνουν παροχή ίση με την $Q_{\max} = 0,024 \frac{m^3}{\text{sec}}$.

Πίνακας 4.5: Αντιστοιχία μετρητών με τις αντίστοιχες τιμές μέγιστης διαφορικής πίεσης

ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΤΩΝ		ΕΥΡΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΜΕΤΡΗΤΩΝ		ΕΥΡΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ
D_1 [mm]	D_2 [mm]	DP (Pa)	D_1 [mm]	D_2 [mm]	DP (Pa)
60	15	38130	80	40	554
60	20	10115	80	45	327
60	25	3897	80	50	199
60	30	1771	90	15	38382
60	35	881	90	20	10285
60	40	459	90	25	4047
60	45	241	90	30	1907
70	15	38268	90	35	1006
70	20	10209	90	40	574
70	25	3980	90	45	345
70	30	1846	90	50	216
70	35	949	100	15	38408
70	40	521	100	20	10302
70	45	296	100	25	4061
70	50	171	100	30	1920
80	15	38340	100	35	1019
80	20	10257	100	40	585
80	25	4023	100	45	356
80	30	1885	100	50	226
80	35	986	100	57	126

Μελετώντας τα δεδομένα όλων των μετρητών παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετοί μετρητές που παρουσιάζουν μικρές διαφορικές τιμές πίεσης, ωστόσο ο μοναδικός μετρητής που παρέχει τη μέγιστη παροχή $Q_{\max} = 0,024 \text{ m}^3/\text{sec}$ με τη μικρότερη πιεζομετρική διαφορά $DP=12$ [Pa] είναι αυτός με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $D_1 = 10$ [mm], $D_2 = 5$ [mm] και $b = \frac{D_2}{D_1}$. Όλα τα λεπτομερή αποτελέσματα που μας οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου μετρητή παρουσιάζονται αναλυτικά στο Πίνακα 4.6.

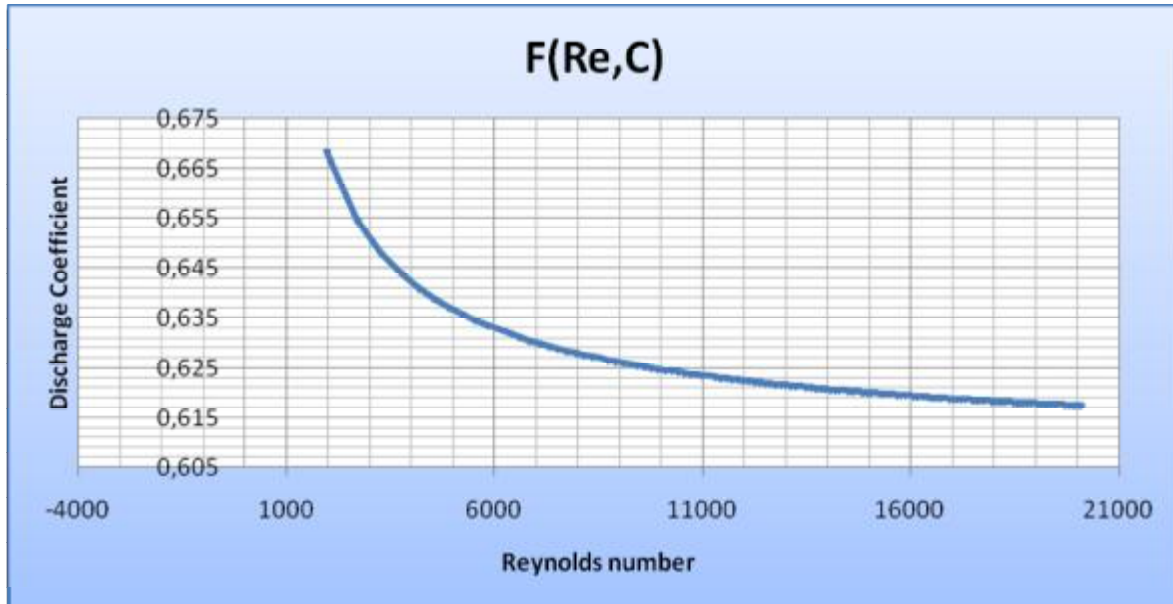
Πίνακας 4.6: Μετρήσεις με μετρητή $D_1=100[mm]$, $D_2=57[mm]$.

DP(Pa)	Q(m ³ /s)	C	e	Re	Uu(m/s)	Uh _{zf} (m/s)
1	0,00232	0,66842	1	1940,1	0,2959	0,058
2	0,00322	0,65466	0,99999	2687,3	0,4099	0,08
3	0,0039	0,64812	0,99999	3258,3	0,497	0,098
4	0,00448	0,64405	0,99999	3738,8	0,5702	0,112
5	0,00498	0,64118	0,99999	4161,4	0,6347	0,125
6	0,00544	0,63901	0,99998	4543,1	0,6929	0,136
7	0,00586	0,63728	0,99998	4893,9	0,7464	0,146
8	0,00625	0,63586	0,99998	5220,1	0,7962	0,156
9	0,00662	0,63467	0,99998	5526,4	0,8429	0,165
10	0,00696	0,63364	0,99997	5815,9	0,887	0,174
11	0,00729	0,63275	0,99997	6091,1	0,929	0,182
12	0,00761	0,63196	0,99997	6354	0,9691	0,19
13	0,00791	0,63125	0,99996	6606	1,0075	0,198
14	0,0082	0,63062	0,99996	6848,5	1,0445	0,205
15	0,00848	0,63004	0,99996	7082,3	1,0802	0,212
16	0,00875	0,62951	0,99996	7308,5	1,1147	0,219
17	0,00901	0,62903	0,99995	7527,6	1,1481	0,225
18	0,00927	0,62858	0,99995	7740,3	1,1805	0,232
19	0,00951	0,62817	0,99995	7947,2	1,2121	0,238
20	0,00976	0,62778	0,99995	8148,6	1,2428	0,244
21	0,00999	0,62742	0,99994	8345	1,2728	0,25
22	0,01022	0,62709	0,99994	8536,8	1,302	0,256
23	0,01045	0,62677	0,99994	8724,2	1,3306	0,261
24	0,01066	0,62647	0,99993	8907,6	1,3586	0,267
25	0,01088	0,62619	0,99993	9087,1	1,386	0,272
26	0,01109	0,62592	0,99993	9263,1	1,4128	0,277
27	0,0113	0,62567	0,99993	9435,7	1,4391	0,282
28	0,0115	0,62542	0,99992	9605,1	1,465	0,287
29	0,0117	0,62519	0,99992	9771,5	1,4903	0,292
30	0,01189	0,62497	0,99992	9935	1,5153	0,297
31	0,01209	0,62476	0,99992	10095,8	1,5398	0,302
32	0,01228	0,62456	0,99991	10254	1,5639	0,307
33	0,01246	0,62437	0,99991	10409,7	1,5877	0,312
34	0,01265	0,62418	0,99991	10563,1	1,6111	0,316
35	0,01283	0,624	0,9999	10714,3	1,6341	0,321
36	0,01301	0,62383	0,9999	10863,2	1,6568	0,325
37	0,01318	0,62367	0,9999	11010,1	1,6792	0,33
38	0,01336	0,62351	0,9999	11155	1,7014	0,334
39	0,01353	0,62335	0,99989	11298	1,7232	0,338
40	0,0137	0,62321	0,99989	11439,2	1,7447	0,342
41	0,01386	0,62306	0,99989	11578,6	1,766	0,347

42	0,01403	0,62292	0,99989	11716,3	1,787	0,351
43	0,01419	0,62279	0,99988	11852,4	1,8077	0,355
44	0,01435	0,62266	0,99988	11986,9	1,8282	0,359
45	0,01451	0,62253	0,99988	12119,8	1,8485	0,363
46	0,01467	0,62241	0,99987	12251,3	1,8686	0,367
47	0,01482	0,62229	0,99987	12381,4	1,8884	0,371
48	0,01498	0,62217	0,99987	12510	1,908	0,374
49	0,01513	0,62206	0,99987	12637,3	1,9274	0,378
50	0,01528	0,62195	0,99986	12763,3	1,9466	0,382
51	0,01543	0,62185	0,99986	12888,1	1,9657	0,386
52	0,01558	0,62174	0,99986	13011,6	1,9845	0,389
53	0,01572	0,62164	0,99985	13134	2,0032	0,393
54	0,01587	0,62154	0,99985	13255,1	2,0217	0,397
55	0,01601	0,62144	0,99985	13375,2	2,04	0,4
56	0,01616	0,62135	0,99985	13494,2	2,0581	0,404
57	0,0163	0,62126	0,99984	13612,1	2,0761	0,407
58	0,01644	0,62117	0,99984	13728,9	2,0939	0,411
59	0,01658	0,62108	0,99984	13844,8	2,1116	0,414
60	0,01671	0,621	0,99984	13959,7	2,1291	0,418
61	0,01685	0,62091	0,99983	14073,6	2,1465	0,421
62	0,01699	0,62083	0,99983	14186,6	2,1637	0,425
63	0,01712	0,62075	0,99983	14298,6	2,1808	0,428
64	0,01725	0,62067	0,99982	14409,8	2,1978	0,431
65	0,01738	0,62059	0,99982	14520,1	2,2146	0,435
66	0,01752	0,62052	0,99982	14629,5	2,2313	0,438
67	0,01765	0,62045	0,99982	14738,2	2,2478	0,441
68	0,01777	0,62037	0,99981	14846	2,2643	0,444
69	0,0179	0,6203	0,99981	14953	2,2806	0,448
70	0,01803	0,62023	0,99981	15059,2	2,2968	0,451
71	0,01816	0,62016	0,99981	15164,7	2,3129	0,454
72	0,01828	0,6201	0,9998	15269,4	2,3289	0,457
73	0,01841	0,62003	0,9998	15373,4	2,3447	0,46
74	0,01853	0,61997	0,9998	15476,7	2,3605	0,463
75	0,01865	0,6199	0,99979	15579,3	2,3761	0,466
76	0,01877	0,61984	0,99979	15681,2	2,3917	0,469
77	0,0189	0,61978	0,99979	15782,4	2,4071	0,472
78	0,01902	0,61972	0,99979	15883	2,4224	0,475
79	0,01914	0,61966	0,99978	15982,9	2,4377	0,478
80	0,01925	0,6196	0,99978	16082,2	2,4528	0,481
81	0,01937	0,61954	0,99978	16180,8	2,4679	0,484
82	0,01949	0,61949	0,99978	16278,9	2,4828	0,487
83	0,01961	0,61943	0,99977	16376,3	2,4977	0,49
84	0,01972	0,61938	0,99977	16473,2	2,5125	0,493

85	0,01984	0,61932	0,99977	16569,5	2,5272	0,496
86	0,01995	0,61927	0,99976	16665,2	2,5418	0,499
87	0,02007	0,61922	0,99976	16760,3	2,5563	0,502
88	0,02018	0,61917	0,99976	16855	2,5707	0,504
89	0,02029	0,61912	0,99976	16949	2,585	0,507
90	0,0204	0,61907	0,99975	17042,6	2,5993	0,51
91	0,02052	0,61902	0,99975	17135,6	2,6135	0,513
92	0,02063	0,61897	0,99975	17228,1	2,6276	0,516
93	0,02074	0,61892	0,99975	17320,1	2,6416	0,518
94	0,02085	0,61888	0,99974	17411,6	2,6556	0,521
95	0,02096	0,61883	0,99974	17502,6	2,6695	0,524
96	0,02106	0,61879	0,99974	17593,1	2,6833	0,527
97	0,02117	0,61874	0,99973	17683,2	2,697	0,529
98	0,02128	0,6187	0,99973	17772,8	2,7107	0,532
99	0,02139	0,61865	0,99973	17861,9	2,7243	0,535
100	0,02149	0,61861	0,99973	17950,6	2,7378	0,537
101	0,0216	0,61857	0,99972	18038,8	2,7513	0,54
102	0,0217	0,61852	0,99972	18126,6	2,7647	0,543
103	0,02181	0,61848	0,99972	18214	2,778	0,545
104	0,02191	0,61844	0,99972	18301	2,7912	0,548
105	0,02201	0,6184	0,99971	18387,5	2,8044	0,55
106	0,02212	0,61836	0,99971	18473,6	2,8176	0,553
107	0,02222	0,61832	0,99971	18559,3	2,8306	0,556
108	0,02232	0,61828	0,9997	18644,6	2,8436	0,558
109	0,02242	0,61824	0,9997	18729,5	2,8566	0,561
110	0,02253	0,61821	0,9997	18814	2,8695	0,563
111	0,02263	0,61817	0,9997	18898,1	2,8823	0,566
112	0,02273	0,61813	0,99969	18981,9	2,8951	0,568
113	0,02283	0,6181	0,99969	19065,2	2,9078	0,571
114	0,02293	0,61806	0,99969	19148,2	2,9205	0,573
115	0,02302	0,61802	0,99969	19230,9	2,9331	0,576
116	0,02312	0,61799	0,99968	19313,1	2,9456	0,578
117	0,02322	0,61795	0,99968	19395,1	2,9581	0,581
118	0,02332	0,61792	0,99968	19476,6	2,9705	0,583
119	0,02342	0,61788	0,99967	19557,8	2,9829	0,585
120	0,02351	0,61785	0,99967	19638,7	2,9953	0,588
121	0,02361	0,61782	0,99967	19719,2	3,0076	0,59
122	0,02371	0,61778	0,99967	19799,4	3,0198	0,593
123	0,0238	0,61775	0,99966	19879,3	3,032	0,595
124	0,0239	0,61772	0,99966	19958,9	3,0441	0,597
125	0,02399	0,61769	0,99966	20038,1	3,0562	0,6
126	0,02409	0,61765	0,99965	20117	3,0682	0,602

Ωστόσο, αξιοσημείωτη είναι η συμπεριφορά του συντελεστή ροής C με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Γι' αυτό το λόγο θα σχεδιάσουμε ένα γράφημα $f(Re, C)$, στο οποίο γίνεται αντιληπτό ότι για τιμές μεγαλύτερες του $Re_{cris} > 5523,3$ η τιμή του συντελεστή ροής τείνει στην τιμή $C \cong 0,615$, γεγονός που μας οδηγεί στην εμπειρικό προσδιορισμό της τιμής του. Έτσι μπορούμε να συγκρίνουμε την πειραματική τιμή του συντελεστή ροής με την αντίστοιχη θεωρητική του τιμή.



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση του συντελεστή ροής με τον αριθμό Reynolds

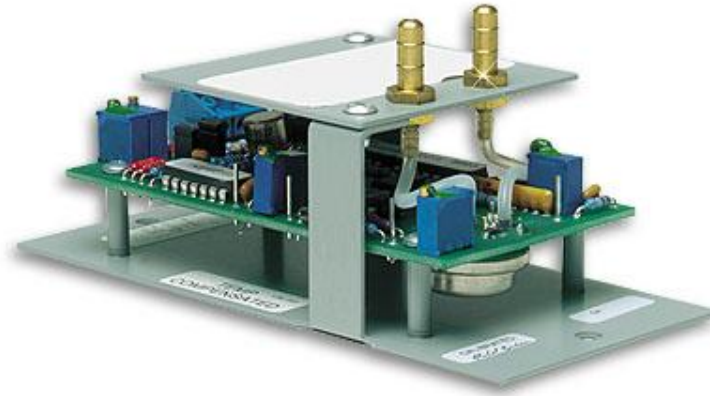
4.2.1.2 Μετρητής διαφορικής πίεσης

Για τον υπολογισμό της ογκομετρικής παροχής του ρευστού είναι απαραίτητη η τιμή της διαφορικής πίεσης μεταξύ ανάντη και κατάντη πλευράς του μετρητή διαφράγματος. Σύμφωνα με την επαναληπτική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό των διατάσεων του μετρητή orifice plate προέκυψε ότι ο μετρητής με χαρακτηριστικά $D_1=100[mm]$, $D_2=57[mm]$ μέτρα ένα φάσμα ογκομετρικών παροχών από

$$Q_{\min} = 0,00232 \left(\frac{m^3}{\text{sec}} \right) \text{ έως } Q_{\max} = 0,024 \left(\frac{m^3}{\text{sec}} \right) \text{ σε τιμές διαφορικής πίεσης από } DP_{\min} = 1(Pa)$$

έως $DP_{\max} = 126(Pa)$. Το κύριο κριτήριο στην επιλογή ενός μετρητή διαφράγματος πίεσης είναι το εύρος λειτουργίας του, το κόστος του το οποίο εξαρτάται άμεσα από το εύρος λειτουργίας του, καθώς και οι διαστάσεις του αφού μεγάλες διαστάσεις καθιστούν δύσκολη την εγκατάσταση του και καθιστούν το σύστημα μη λειτουργικό.

Κατόπιν έρευνας αγοράς βρέθηκε ένας μετρητής διαφορικής πίεσης ο οποίος καλύπτει τα κριτήριά μας. Η Κατασκευαστική ονομασία του μοντέλου είναι PX-275 και η κατασκευάστρια εταιρία του είναι η Omega.



Εικόνα 4.4: Μοντέλο PX-275 της εταιρίας OMEGA (www.omega.com)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετρητή παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7, ενώ τα εύρη λειτουργίας του είτε σε inH_2O είτε σε Pascals παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8 :

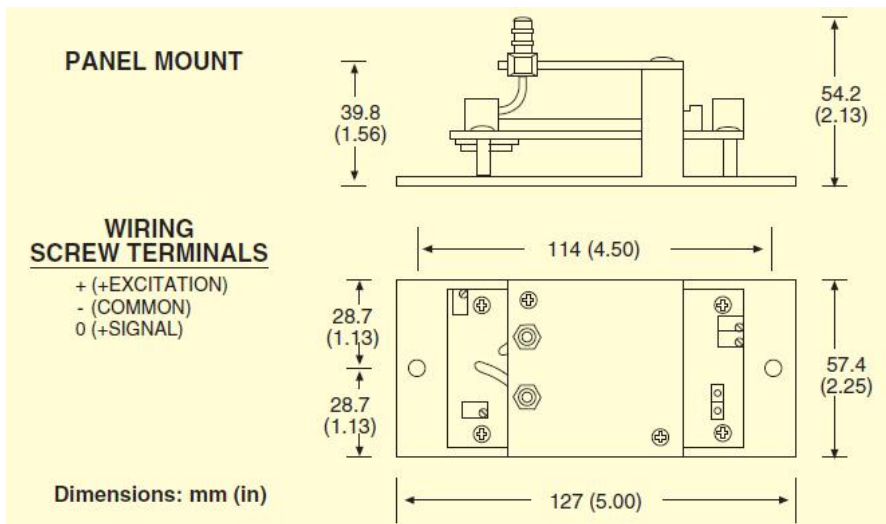
Πίνακας 4.7: Τεχνικές προδιαγραφές μετρητή διαφορικής πίεσης (www.omega.com).

SPECIFICATIONS		
I.	Excitation	4 to 20 mA : 12 to 40 V dc 5 to 10 V : 12 to 35 V dc
II.	Output	4 to 20 mA 0 to 5 or 0 to 10 V dc
III.	Accuracy	$\pm 1,0\%$ FS
IV.	Operating Temperature	-18 to 80 °C
V.	Compensated Temperature	-4 to 65 °C
VI.	Thermal Effects	0,02 % FS/°C
VII.	Proof Pressure	10 psi

Πίνακας 4.8: Εύρη λειτουργίας μετρητή διαφορικής πίεσης (www.omega.com).

Model	Selectable Ranges (inH ₂ O)	Selectable Ranges (Pa)
PX 275-01DI	0 to 1,0	0 to 249
	0, to 0,5	0 to 124
	0 to 0,25	0 to 62
	-0,5 to 0.5	-124 to 124
	-0,25 to 0,25	-62 to 62
	-0,125 to 0,125	-31 to 31

Η σύνδεση των πιεζομετρικών οπών πίεσης στον αγωγό εισαγωγής με τις οπές του μετρητή επιτυγχάνεται με εύκαμπτους σωλήνες σιλικόνης μεγέθους $(\frac{3}{16})''$, με τον μετρητή να φέρει οπές μεγέθους $(0,2)''$ και το συνολικό του βάρος να ανέρχεται στα 200gr.



Σχήμα 4.3: Διαστάσεις μετρητή (www.omega.com).

4.2.1.3 Μετρητής θερμοκρασίας

Ο σχεδιασμός του αγωγού εισαγωγής του ρευστού πραγματοποιήθηκε με γνώμονα τον έλεγχο των συνθηκών εισόδου της ροής, μέσω του ελέγχου της παροχής καθώς και της θερμοκρασίας. Προκειμένου όμως να προσδιοριστεί η παροχή απαιτείται πρώτα ο προσδιορισμός των μεγεθών της πυκνότητας και του ιξώδους του ρευστού. Για να επιτευχθεί αυτό, θα τοποθετηθεί ένας θερμοκρασιακός μετρητής προκειμένου μέσω της καταγραφής της θερμοκρασίας θα υπολογίζονται έμμεσα και οι τιμές της πυκνότητας και του ιξώδους.

Στην περίπτωση μας, θα χρησιμοποιηθεί ένας θερμοκρασιακός μετρητής thermocouple τύπου k. Αποτελείται από κράματα νικελίου/χρωμίου στον έναν αγωγό, και

νικελίου/αλουμινίου στον δεύτερο αγωγό. Οι ακροδέκτες του έχουν χρώματα κίτρινο και κόκκινο, η αναπτυσσόμενη θερμοηλεκτρική τάση ανέρχεται περίπου στα $40 \frac{mV}{^{\circ}C}$, και η περιοχή λειτουργίας του είναι από $96^{\circ}C$ έως $1260^{\circ}C$. Ο αισθητήρας συνδέεται στα κανάλια ενός μετατροπέα A/D, οπότε οι ενδείξεις του εισάγονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα σε ψηφιακή μορφή μέσα στον Η/Υ και εκεί τυγχάνουν επεξεργασίας.

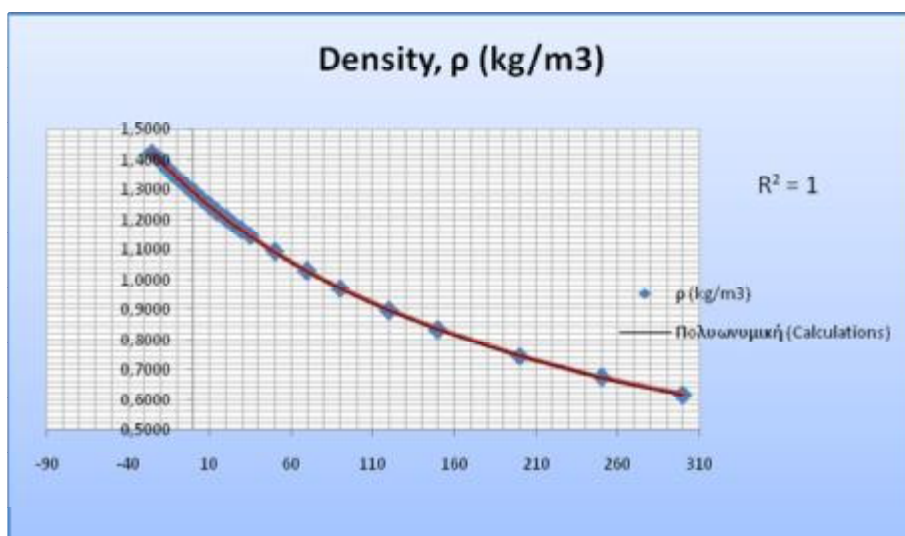
Η εύρεση της θερμοκρασιακής τιμής του ρευστού δεν είναι αρκετή για τον υπολογισμό των τιμών της πυκνότητας και του ιξώδους. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να δημιουργηθούν κατάλληλες σχέσεις που θα δέχονται τη θερμοκρασιακή τιμή του ρευστού και θα δίνουν ως αποτέλεσμα τις επιθυμητές τιμές της πυκνότητας και του ιξώδους. Για να επιτευχθεί αυτό θα καταγραφούν σε πίνακες οι τιμές της πυκνότητας και του ιξώδους του ρευστού για διάφορες θερμοκρασιακές τιμές υπο ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έπειτα θα δημιουργηθούν δυο γραφικές παραστάσεις, μια $f(T, \rho)$ και μια $f(T, \mu)$, από τις οποίες θα εξαχθούν οι επιθυμητές εξισώσεις που θα συνδέουν τη πυκνότητα και το ιξώδες με τη θερμοκρασία.

Πίνακας 4.9: Αντιστοίχιση θερμοκρασιακών τιμών με τις αντίστοιχες της πυκνότητας.

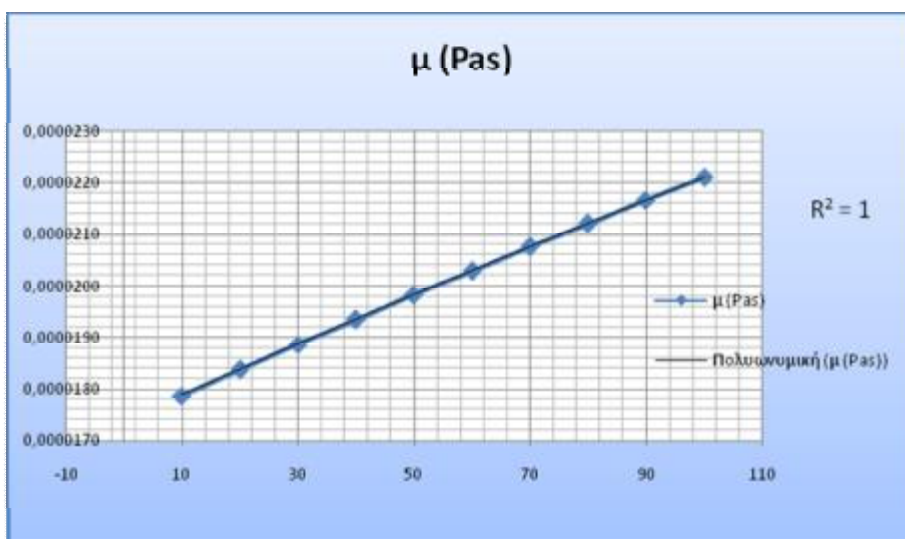
$T(^{\circ}C)$	$\rho(kg/m^3)$	$T(^{\circ}C)$	$\rho(kg/m^3)$
300	0,6157	20	1,2041
250	0,6746	15	1,2250
200	0,7459	10	1,2466
150	0,8341	5	1,2690
120	0,8977	0	1,2920
90	0,9719	-5	1,3163
70	1,0286	-10	1,3413
50	1,0923	-15	1,3673
35	1,1455	-20	1,3943
30	1,1644	-25	1,4224
25	1,1839		

Πίνακας 4.10: Αντιστοίχιση θερμοκρασιακών τιμών με τις αντίστοιχες του ιξώδους.

$T(^{\circ}C)$	$\mu(Pas)$
10	0,0000179
20	0,0000184
30	0,0000189
40	0,0000193
50	0,0000198
60	0,0000203
70	0,0000208
80	0,0000212
90	0,0000217
100	0,0000221



Σχήμα 4.4a.: Γραφική παράσταση $f(T, \rho)$



Σχήμα 4.4b.: Γραφική παράσταση $f(T, \mu)$

Σύμφωνα με τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις οι εξισώσεις που προκύπτουν παρουσιάζονται στην συνέχεια:

$$r(T) = 1,29231 - 0,00473 \cdot T + 0,170486 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,538202 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 0,115419 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 - 0,11218 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 \quad (4.1)$$

και αντίστοιχα για το ιξώδες,

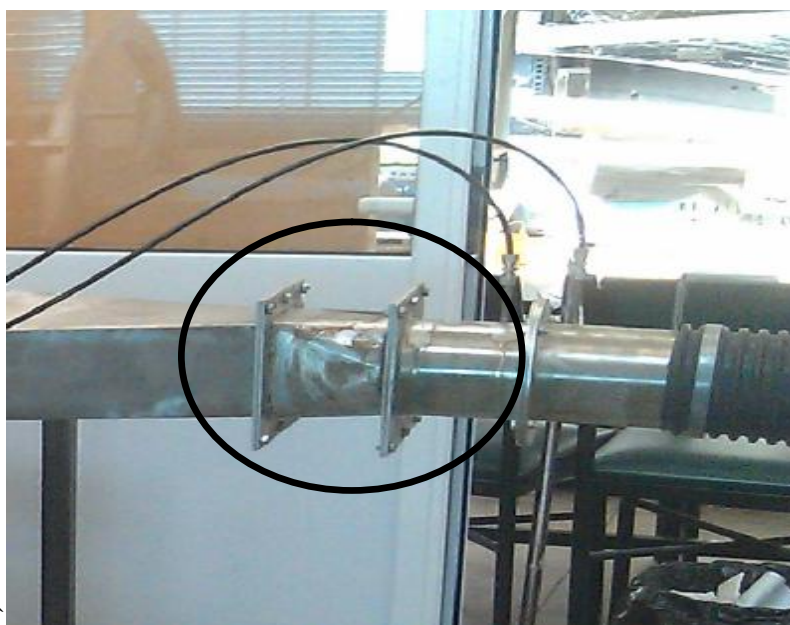
$$m(T) = 0,001 \cdot \left[0,01827 \cdot \left(\frac{((0,555 \cdot 524,07) + 120)}{\left(0,555 \left((T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} \right) + 120 \right)} \right) \right] \cdot \left[\frac{\left((T + 273,15) \cdot \frac{9}{5} \right)}{524,07} \right]^{1,5} \quad (4.2)$$

4.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ ΡΟΗΣ (ΔΙΑΧΥΤΗΣ)

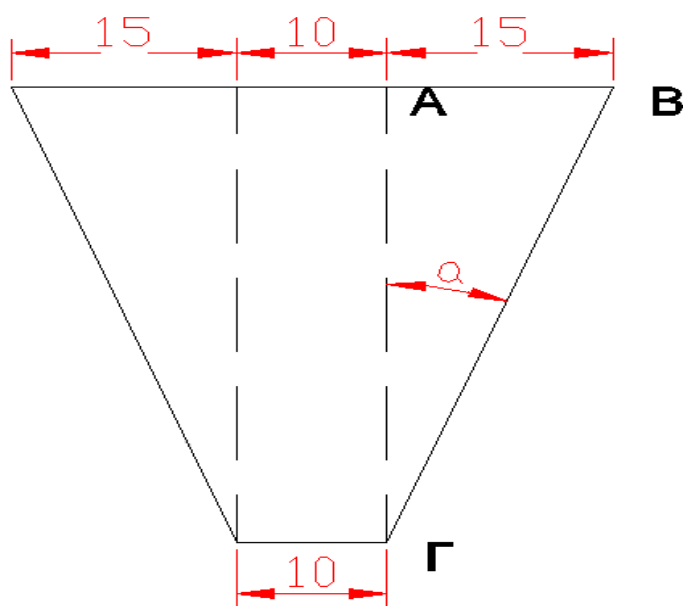
Καθώς η ροή διέρχεται από τον κυκλικό αγωγό εισαγωγής, όπου πραγματοποιείται η μέτρηση της παροχής του, πρέπει να εισαχθεί στον θάλαμο καύσης των υπο δοκιμή υλικών. Όμως καθώς η ροή διέρχεται από το μετρητή διαφράγματος αποκολλείται από τα τοιχώματα του αγωγού με τη δημιουργία στροβίλων ανακυκλοφορίας κατά μήκος του αγωγού. Επομένως αναπόφευκτα το ρευστό οδηγείται στο θάλαμο καύσης με τυρβώδες χαρακτήρα. Για την αποφυγή του φαινομένου αποκόλλησης καθώς και την αποκατάσταση του ροϊκού χαρακτήρα του ρευστού υπάρχουν δυο λύσεις.

Η πρώτη απαιτεί επιμήκυνση του αγωγού σύνδεσης μεταξύ μετρητή παροχής και θαλάμου καύσης προκειμένου το ρευστό να έχει αρκετό μήκος για να ομαλοποιηθεί η ροή του, ενώ η δεύτερη λύση αναφέρεται στη χρήση ενός διαχύτη για τη σύνδεση των δυο μερών μειώνοντας σημαντικά την απόσταση μεταξύ τους επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή και σταθερή τιμή παροχής αέρα σε όλο το θάλαμο μετρήσεων.

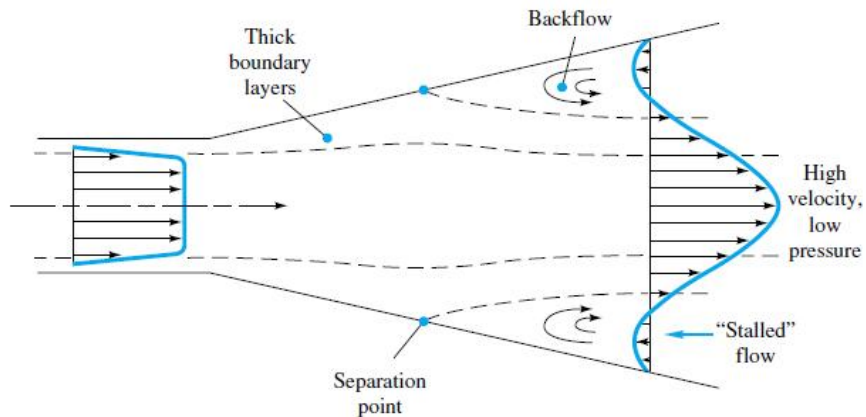
Στην περίπτωση μας, θα χρησιμοποιηθεί ο διαχύτης για την σύνδεση των κομματιών αφού δε θέλουμε η πειραματική συσκευή να αποκτήσει μεγάλο μήκος. Αρχικά στο τέλος του κυκλικού αγωγού εισαγωγής θα συγκολληθεί μια μεταλλική τετραγωνική φλάντζα διαστάσεων $100[mm] \times 100[mm]$, προκειμένου να μην υπάρχει απώλεια ρευστού όταν ο κυκλικός αγωγός συναντά το τετραγωνικό προφίλ του διαχύτη, *Εικόνα 4.5*. Στη συνέχεια ακολουθεί ο σχεδιασμός του διαχύτη με γνωστά μόνο τα χαρακτηριστικά του προφίλ εισόδου $100[mm] \times 100[mm]$ και εξόδου $100[mm] \times 400[mm]$, *Σχήμα 4.5*. Ωστόσο η σημαντικότητα του σχεδιασμού του διαχύτη έγκειται στη συμβολή της διάταξης στην ομαλοποίηση της ροής, και ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά της ροής κατά της είσοδο της στο διαχύτη είναι η γωνία αποκόλλησης α . Όταν το ρευστό εισέρχεται στο διαχύτη, τότε η ροή αποκλίνει αφού η επιφάνεια της διατομής της ροής αυξάνεται με αποτέλεσμα οι γραμμές ροής να αποκλίνουν και να μειώνεται η μέση ταχύτητα της ροής, τότε παρατηρείται στις περιοχές μειωμένης ταχύτητας η εμφάνιση του φαινομένου της αποκόλλησης, *Σχήμα 4.6*.



Εικόνα 4.5: Φλάντζες σύνδεσης

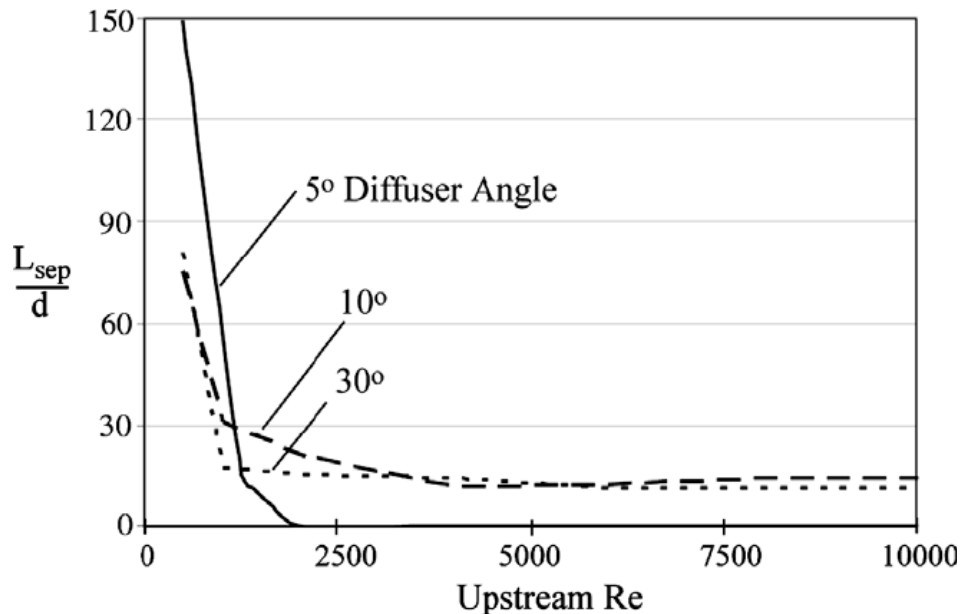


Σχήμα 4.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διαχύτη



Σχήμα 4.6: Εμφάνιση φαινομένου αποκόλλησης (Frank M. White, 1998).

Σύμφωνα με αρκετές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για το προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής της γωνίας αποκόλλησης, προέκυψε ότι αυτή η τιμή βρίσκεται στο εύρος των 5° – 10° . Ωστόσο για μικρές τιμές γωνίας ο μετρητής θα γίνει αρκετά μεγάλος και θα παρουσιάζει μεγάλες γραμμικές απώλειες ενώ για μεγάλες τιμές η αποκόλληση θα εμφανίζεται από πολύ μικρές τιμές του αριθμού Reynolds σύμφωνα με το Σχήμα 4.7. Επομένως για ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας ο σχεδιασμός του διαχύτη θα βασιστεί στη γωνία αποκόλλησης $\alpha = 7^{\circ}$.



Σχήμα 4.7: Κρίσιμα σημεία εμφάνισης αποκόλλησης της ροής για διάφορες γωνίες αποκόλλησης (E.M. Sparrow et al, 2009).

Αρχικά ξεκινάμε βρίσκοντας το μήκος του διαχύτη χρησιμοποιώντας απλές γεωμετρικές σχέσεις, για τον υπολογισμό του:

$$\sin a = \frac{AB}{B\Gamma} \Rightarrow \sin 7^\circ = \frac{15\text{cm}}{B\Gamma} \Rightarrow B\Gamma = \frac{15\text{cm}}{\sin 7^\circ} = \frac{15\text{cm}}{0,12} = 125\text{cm} \Rightarrow B\Gamma = 1,25[m]$$

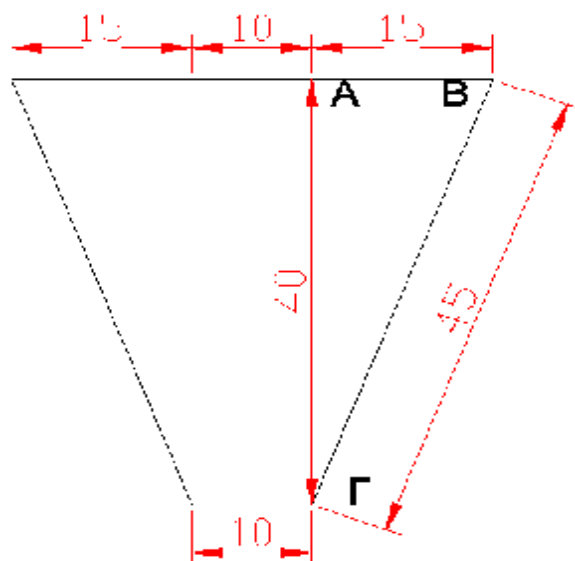
Αφού βρέθηκε η μια εκ των δυο πλευρών του διαχύτη, δε μένει παρά ο υπολογισμός του μήκους του διαχύτη ΑΓ εργαζόμενοι όμοια με τη παραπάνω διαδικασία προκύπτει :

$$\cos 7^\circ = \frac{A\Gamma}{125\text{cm}} \Rightarrow A\Gamma = \cos 7^\circ \cdot 125 = 124\text{cm} \Rightarrow A\Gamma = 1,24[cm]$$

Έτσι σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι το μήκος του διαχύτη θα είναι $1,24[m]$, ενώ οι πλευρές του θα έχουν μήκος $1,25[m]$. Όμως, λόγω του περιορισμένου χώρου που διαθέτουμε, ο διαχύτης δε μπορεί να κατασκευαστεί με μήκος τα $1,24[m]$. Το συγκεκριμένο μήκος θεωρείται αρκετά μεγάλο, και για πρακτικούς λόγους το μήκος του θα μειωθεί στα $40[cm]$ που θεωρείται μια ικανοποιητική τιμή. Άρα η πλευρά ΒΓ θα μεταβληθεί σε :

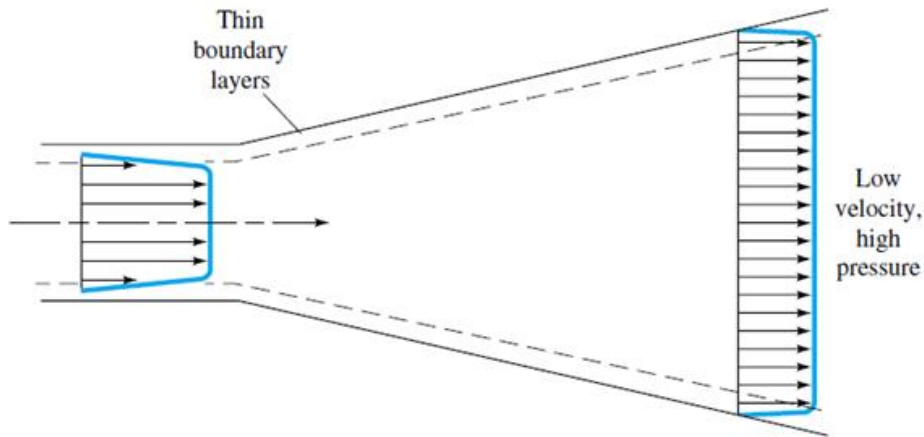
$$\cos a^\circ = \frac{A\Gamma}{B\Gamma} \Rightarrow \cos a^\circ = \frac{40\text{cm}}{B\Gamma} \Rightarrow B\Gamma = \frac{40\text{cm}}{0,99} \Rightarrow B\Gamma = 40,4[cm]$$

Με το πέρας των υπολογισμών καταλήξαμε στις νέες και τελικές τιμές του διαχύτη, που παρουσιάζονται στη συνέχεια :

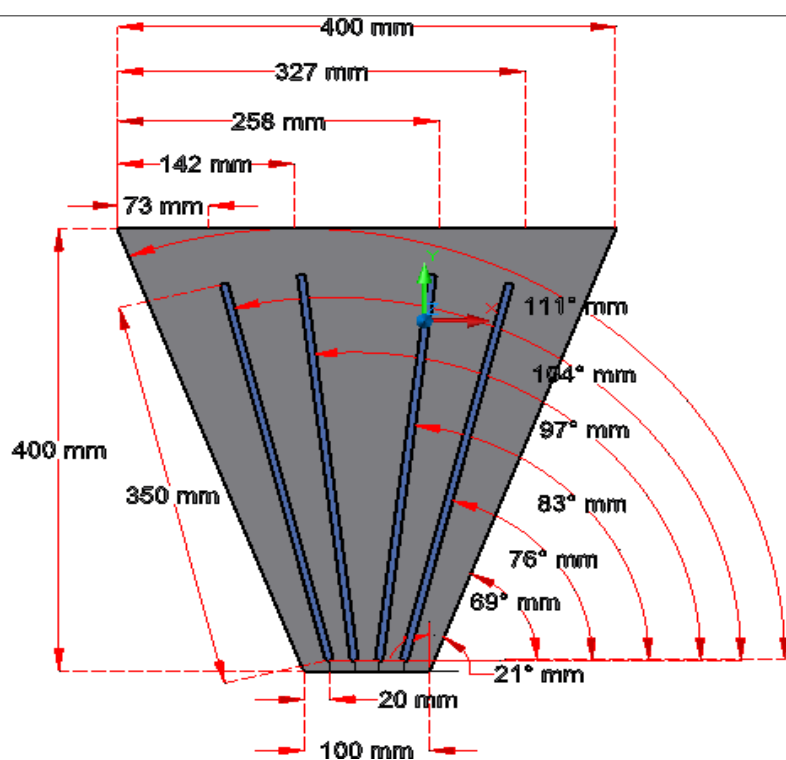


Σχήμα 4.8: Τελικές διαστάσεις διαχύτη

Παρά την ιδιαίτερη προσοχή που δόθηκε στον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής αποκόλλησης ο διαχύτης μπορεί σε μεγάλες τιμές Reynolds να μη συμπεριφέρεται ιδανικά, σύμφωνα με το Σχήμα 4.9, και η απόδοσή του να θεωρείται χαμηλή με τη δημιουργία νέων στροβίλων ανακυκλοφορίας να λαμβάνουν χώρα στη ροή. Γι' αυτό το λόγο, μετά τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του διαχύτη, θα μελετηθεί η διάταξη του διαχύτη για την τοποθέτηση οδηγών περυγίων. Το αποτέλεσμα της τοποθέτησης των περυγίων είναι η τροφοδότηση του θαλάμου καύσης με παροχή ρευστού ίδιας τιμής από κάθε διατομή των περυγίων καθώς συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της γωνίας αποκόλλησης. Από τη στιγμή που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του διαχύτη είναι εύκολο να τοποθετηθούν τα περύγια. Έτσι θα χωρίσουμε το προφίλ εξόδου του διαχύτη σε πέντε μέρη ώστε το πλάτος των $400[mm]$ να μετατραπεί σε $5περ\eta \times 80[mm]$, ενώ το προφίλ εισόδου θα χωριστεί σε $5περ\eta \times 200[mm]$, με αποτέλεσμα την κατασκευή τεσσάρων περυγίων στις θέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 4.10 και Εικόνα 4.6.



Σχήμα 4.9: Ιδανική συμπεριφορά ροής στον διαχύτη (Frank M. White, 1998).



Σχήμα 4.10.: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πτερυγίων

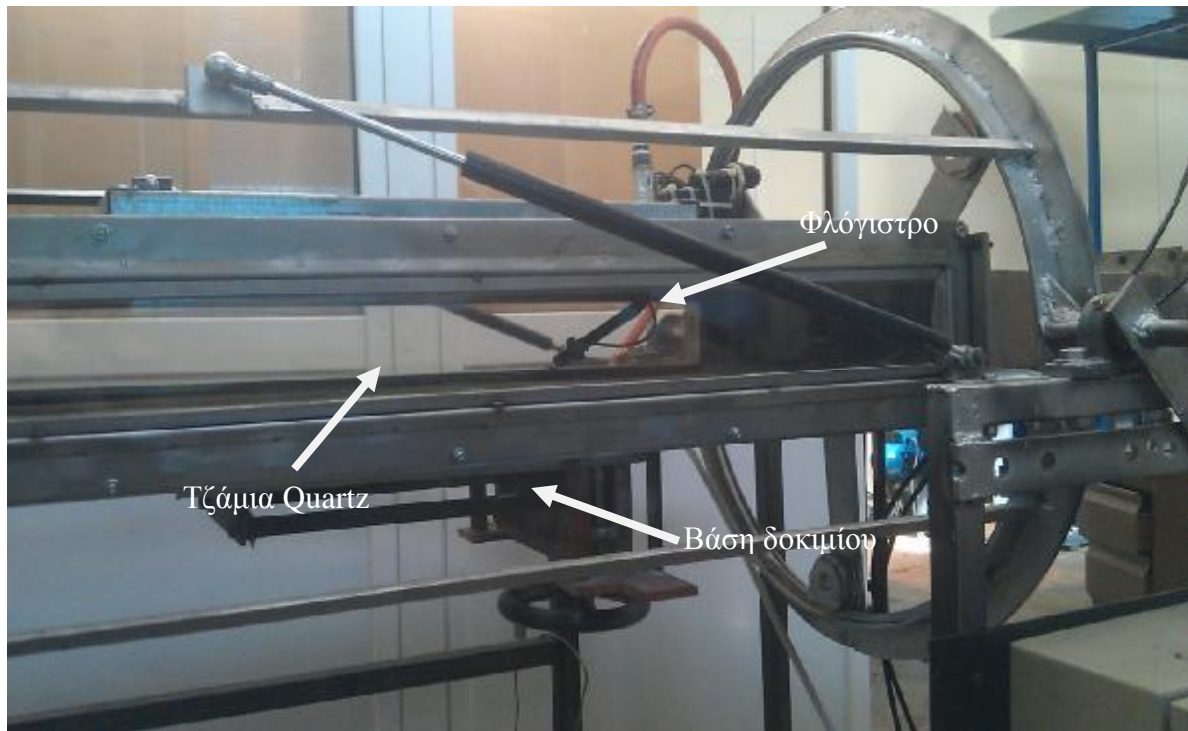


Εικόνα 4.6: Μορφή οδηγών πτερυγίων τοποθετημένα στον διαχύτη

4.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ

Ο θάλαμος καύσης πρέπει να προσομοιώνει το στενό πέρασμα του αέρα στις κρυφές περιοχές των αεροσκαφών. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θαλάμου ανέρχονται στα 1[m] μήκος, 0,40 [m] πλάτος και 0,10[m] ύψος. Στην είσοδο του καναλιού εισαγωγής τοποθετείται ένας ανεμιστήρας ο οποίος προκαλεί την εξαναγκασμένη ροή αέρα μέσα στο θάλαμο καύσης η οποία ανακυκλώνεται μέσα στον θάλαμο. Μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης του καναλιού εισαγωγής του αέρα επιτρέπεται στον χειριστή της συσκευής να μεταβάλλει ανά πάσα στιγμή τις συνθήκες πίεσης στον θάλαμο καύσης. Τα εκάστοτε υποδοκιμή δείγματα έχουν μέγεθος μήκους 0,30 [m], πλάτους 0,20 [m], τα οποία τοποθετούνται στο κάτω τοίχωμα της σήραγγας και ακτινοβολούνται με μια ομοιόμορφη θερμική ροή από έναν θερμοπομπό υπέρυθρης ακτινοβολίας που είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω από το δείγμα και η μέγιστη θερμική ακτινοβολία που μπορεί να φτάσει είναι τα 60 [kW/m²]. Έπειτα το μίγμα αερίων που προκαλείται από την πυρόλυση του δείγματος μέσω της ροής του αέρα θα κατευθυνθεί προς ένα φλόγιστρο, που είναι τοποθετημένο 10 [mm] κάτω από το δείγμα και 5 [mm] από το πλευρικό τοίχωμα του θαλάμου, προκειμένου να προκληθεί ελεγχόμενη ανάφλεξη του μίγματος και την ανάπτυξη εστίας φωτιάς επάνω στο υλικό.

Η θερμοκρασία του φλόγιστρου διατηρείται κοντά στα 1000[°C] κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων. Επίσης τα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου καύσης φέρουν ειδικά θερμικά τζάμια τύπου quartz, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η παρατήρηση των φαινομένων που εξελίσσονται εντός του θαλάμου, ενώ όλοι οι υπόλοιποι χώροι είναι θερμικά μονωμένοι για τη μείωση των θερμικών απωλειών. Επίσης θερμοζεύγη τύπου K θα τοποθετηθούν στο κάτω μέρος του υλικού για την καταγραφή της κατανομής της θερμοκρασίας στο υλικό σε περίπτωση διαπέρασης της φωτιάς από το υλικό (burnthrough). Ο έλεγχος όλων των μετρητικών οργάνων επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος ελέγχου FieldPoint, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο χειριστή της συσκευής την εποπτεία τους μέσα από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 4.7: Διαμόρφωση θαλάμου καύσης

Για την διεξαγωγή του πειράματος, ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται διέρχεται από το κανάλι εισαγωγής όπου μετράται η μαζική παροχή του και στη συνέχεια περνά από το διαχύτη όπου η ροή ομαλοποιείται. Ο θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας, ανά περίπτωση δοκιμής ενεργοποιείται για ένα χρονικό διάστημα, για την ακτινοβόληση του υλικού και με τη διακοπή της λειτουργίας του ενεργοποιείται το φλόγιστρο. Τα αέρια της πυρόλυσης αφήνουν την επιφάνεια του δοκιμίου και διαχέονται προς το φλόγιστρο, όπου το μίγμα αέρα/αερίων πυρόλυσης μπορεί να αναφλεγεί έναν και μόνο αν οι συνθήκες πίεσης είναι κατάλληλες, αλλιώς αναφλέγονται με την έναρξη του φλόγιστρο. Ο χρόνος ανάφλεξης μετράται ως ο χρόνος που μεσολαβείτε μεταξύ της έναρξης της θερμικής ροής μέχρι την εμφάνιση φλόγας επάνω στο υλικό. Η διάρκεια της ανάφλεξης (time to ignition) κρίνεται οπτικά και προσδιορίζεται με την επιθεώρηση της θερμοκρασιακής τιμής των θερμοζευγών και στις μεταβολές της απώλειας μάζας του υλικού.

4.4.1 Μονωτικές πλάκες

Στο θάλαμο καύσης της πειραματικής συσκευής αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασιακές τιμές από τη καύση των υλικών, γι' αυτό το λόγο ο θάλαμος καύσης πρέπει να είναι θερμικά μονωμένος σε όλες του τις πλευρές για να μειωθούν οι θερμικές απώλειες από το θάλαμο καύσης προς το περιβάλλον. Επομένως κατόπιν έρευνας αγοράς επιλέχθηκαν οι θερμομονωτικές πλάκες Millboard 85kB του κατασκευαστικού οίκου Unifrax. Πρόκειται για ένα υλικό κατασκευασμένο από ίνες ορυκτοβάμβακα αναμεμειγμένες με υλικά πλήρωσης από πηλό. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του το υλικό είναι κατάλληλο για εφαρμογές με θερμοκρασίες λειτουργίας έως και τους 850[°C]. Σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην αγορά τους είναι το γεγονός ότι οι ίνες ορυκτοβάμβακα που χρησιμοποιούνται είναι βιοδιασπώμενες έτσι ώστε να καθιστούν το προϊόν ακίνδυνο προς τον ανθρώπινο οργανισμό. Το προϊόν εξαιτίας της υψηλής πυκνότητάς του είναι αρκετά άκαμπτο και θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογές θερμικής μόνωσης καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές στεγανοποίησης. Όλα τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν το υλικό παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 4.11, ενώ η μορφολογία του παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.

Πίνακας 4.11: Πλεονεκτήματα θερμομονωτικής πλάκας Millboard 85kB (www.kmmb.gr).

ADVANTAGES OF MILLBOARD 85KB	
1.	Υψηλή θερμική σταθερότητα
2.	Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
3.	Αντίσταση σε απότομες θερμικές μεταβολές
4.	Υψηλή διαστατική σταθερότητα με χαμηλά ποσοστά συρρίκνωσης
5.	Εύκολο στη διαμόρφωσή του με συμβατικά εργαλεία κοπής

Επίσης απαραίτητες είναι και οι τυπικές παράμετροι που συνοδεύουν το υλικό, όπως η χημική ανάλυση, οι φυσικές ιδιότητες και οι θερμικές του ιδιότητες. Όλες αυτές εμφανίζονται αναλυτικά στο Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Τεχνικοί παράμετροι Millboard 85kB (www.kmmb.gr).

TYPICAL PRODUCT PARAMETERS							
Typical Chemical Analysis (wt.%)	Millboard 85 kB	Physical Properties	Millboard 85 kB	Thermal conductivity	Millboard 85 kB	Permanent Linear	Millboard 85 kB
SiO ₂	53,3	Color	Grey	Mean. Temp.		Shrinkage (%) 24 hours Soak	
Al ₂ O ₃	20,6	Product Density, (kg/m ³)	910	400(°C)	0,10	850(°C)	< 2
CaO+MgO	3,7	Tensile Strength, (MPa)	3,0	600(°C)	0,11	1000(°C)	-
Fe ₂ O ₃ +TiO ₂	3,9	Use Limit, (°C)	850	800(°C)	0,13		
Alkalis	1,9	Loss on ignition, (°C)	18,0	1000(°C)	-		
Organic binders	10						

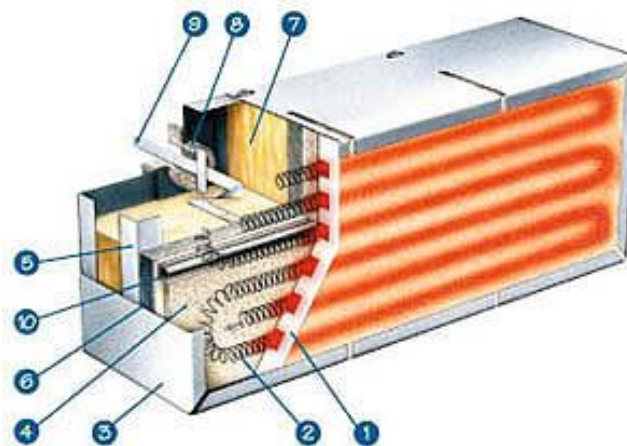


Σχήμα 4.11: Μορφολογία μονωτικών πλακών Millboard 85kB της εταιρίας Unifrax (www.kmmb.gr).

4.4.2 Θερμοπομπός υπέρυθρης ακτινοβολίας

Σύμφωνα με τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης το εκάστοτε υπο δοκιμή υλικό θα ακτινοβολείται με υπέρυθη ακτινοβολία από ένα επίπεδο θερμοπομπό ο οποίος θα είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω από το υλικό. Η ακτινοβολήση του υλικού συμβάλλει στην ταχύτερη εμφάνιση του φαινομένου της πυρόλυσης στο υλικό, γι' αυτό το λόγο άλλωστε θα εγκατασταθεί ένας επίπεδος θερμοπομπός της σειράς Q από την κατασκευάστρια εταιρία SolarProductsInc.. Η πρόσοψη του θερμοπομπού είναι κατασκευασμένη από διοξειδίο του πυριτίου ή αλλιώς με την εμπορική του ονομασία quartz, το οποίο θεωρείται ένας πολύ αποδοτικός διαχύτης της υπέρυθρης ενέργειας ενώ το περίβλημα του θερμοπομπού είναι από χάλυβα με επιστρώσεις αλουμινίου. Το πίσω μέρος της πρόσοψης του quartz είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να συγκρατεί τις σπείρες θερμικής αντίστασης. Οι σπείρες είναι τοποθετημένες μέσα σε αυλάκια, οι οποίες περιβάλλονται από τρία τοιχώματα υλικού quartz και έχουν ως αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση της εκπεμπόμενης ενέργειας του θερμοπομπού. Πίσω από το θερμαντικό στοιχείο τοποθετείται μια ανακλαστική μονωμένη επιφάνεια από ίνες ξύλου προκειμένου να κατευθύνει την υπέρυθη ενέργεια προς τα εμπρός μέσα από τη διάφανη επιφάνεια του υλικού quartz. Με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών από το θερμαντικό στοιχείο και πίσω, θα τοποθετηθεί διπλό στρώμα μόνωσης πίσω από την ανακλαστική επιφάνεια.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί ωστόσο, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, στον προσανατολισμό του θερμοπομπού γιατί τοποθετημένος σε κάθετη θέση οι σπείρες αντιστάσεως θα μετατοπιστούν με αποτέλεσμα τη μείωση του προσδόκιμου ζωής του. Συνοψίζοντας, ο θερμοπομπός της σειράς Q επιλέχθηκε γιατί σε αυτόν συγκεντρώνονται πολλά πλεονεκτήματα όπως η μεγάλη τους ανθεκτικότητα που ορίζεται από ένα τυπικό προσδόκιμο ζωής των 25.000 ωρών παρέχοντας υψηλή απόδοση ακτινοβολίας της τάξεως των 82%. Επίσης ο σχεδιασμός του θερμοπομπού δεν έχει βασιστεί πάνω σε εξωτερικό ανακλαστήρα, γι' αυτό και διατηρεί σταθερά υψηλή απόδοση ακτινοβολίας με τη πάροδο του χρόνου που αγγίζει τα 93 kW/m^2 . Όλα τα μέρη που αποτελούν το θερμοπομπό παρουσιάζονται συνοπτικά στο Πίνακα 4.13 ενώ επισημαίνεται η τοποθεσία τους στο Σχήμα 4.12.

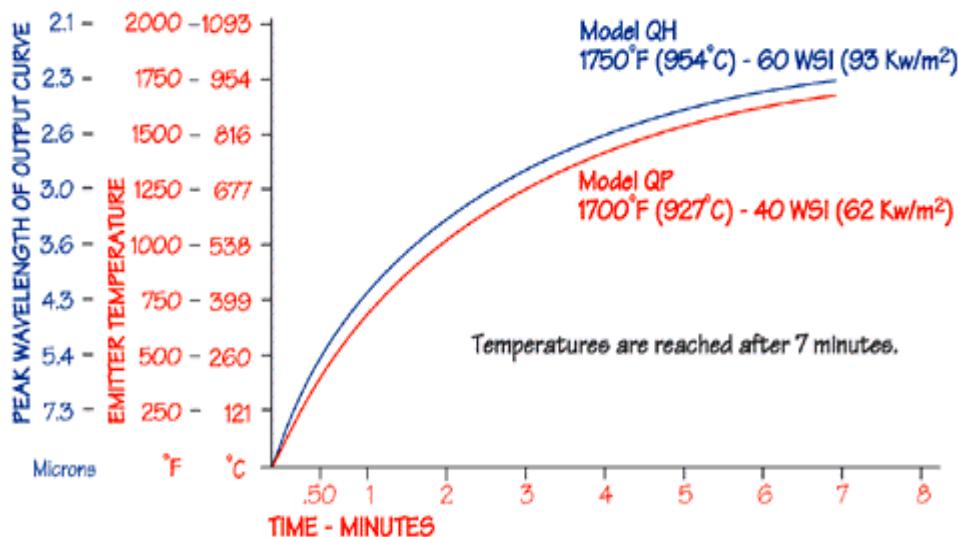


Σχήμα 4.12: Τομή του θερμοπομπού με αρίθμηση των επιμέρους στοιχείων του.

Πίνακας 4.13: Απαρίθμηση των επιμέρους στοιχείων του θερμοπομπού (www.solarproducts.com).

Σημεία	Μέρη Θερμοπομπού
1.	Διαφανής πλάκα quartz εκπομπής ακτινοβολίας, φέροντας στο πίσω μέρος του αυλακώσεις.
2.	Σπείρες αντίστασης τοποθετημένες στις μηχανικά διαμορφωμένες αυλακώσεις.
3.	Πλαίσιο από χάλυβα με εξωτερικές επιστρώσεις από αλουμίνιο.
4.	Ανακλαστήρας άκαμπτος με υψηλή θερμική αντίσταση.
5.	Γωνιά στήριξης της ανακλαστικής επιφάνειας στο μεταλλικό πλαίσιο.
6.	Μονωτική και ανακλαστική επίστρωση.
7.	Μονωτικός αφρός για τη μείωση των θερμικών απωλειών.
8.	Κεραμικές ροδέλες για την θερμική μόνωση των ηλεκτρικών
9.	Τερματικοί ακροδέκτες σύνδεσης κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο ατσάλι.
10.	Προαιρετικός αγωγός quartz στον οποίο είναι τοποθετημένος μέσα ο θερμοκρασιακός μετρητής τύπου thermocouple.

Σημαντική παράμετρος στη λειτουργία του θερμοπομπού είναι οι καμπύλες προθέρμανσης οι οποίες μετρούνται από το θερμοζεύγος που είναι εγκατεστημένο μέσα στον αγωγό quartz πίσω από τις σπείρες ηλεκτρικής αντιστάσεως, προκειμένου να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος χρόνος για την μέγιστη εκπεμπόμενη θερμική ροή. Οι καμπύλες εξαρτώνται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την τοποθεσία του θερμοζεύγους. Μέσω των καμπυλών του Σχήματος 4.13 παρατηρείται ότι τα επιθυμητά αποτελέσματα εμφανίζονται με τη πάροδο επτά λεπτών.



Σχήμα 4.13: Χαρακτηριστικές καμπύλες προθέρμανσης μεταξύ δυο μοντέλων (www.solarproducts.com).

4.4.3 Φλόγιστρο

Αφού το υλικό ακτινοβοληθεί μέσω του θερμαντικού πάνελ για ένα χρονικό διάστημα τότε θα ξεκινήσει η λειτουργία του φλόγιστρου προκειμένου να αναπτυχθεί μια εστία φωτιάς επάνω στο υλικό. Το φλόγιστρο λειτουργεί με παροχή εξωτερικού αέρα και είναι τοποθετημένο στη κάτω μεριά του υλικού σύμφωνα με την Εικόνα 4.8.



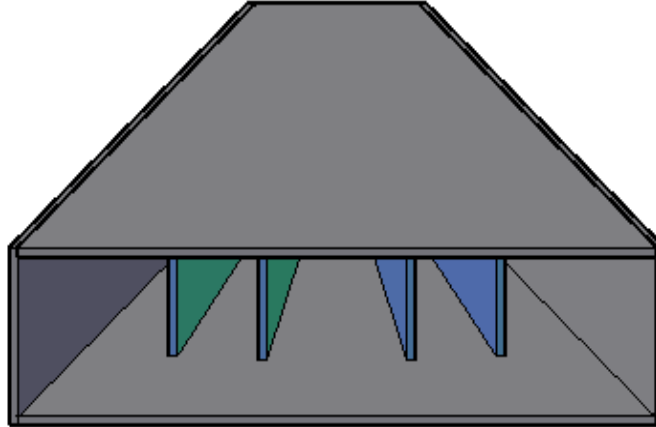
Εικόνα 4.8 : Τοποθέτηση φλόγιστρου

4.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΑ ΑΓΩΓΟΥ ΡΟΗΣ (ΣΥΓΧΥΤΗΣ)

Στο θάλαμο καύσης λαμβάνει χώρα η ακτινοβολήση του υπο δοκιμή υλικού μέσω ενός θερμοπομπού με σκοπό την έναρξη φωτιάς επάνω στο υλικό. Αφού εξελιχθεί η φωτιά μέσω του ανεμιστήρα τα καπναέρια εξαναγκάζονται να κινηθούν από το θάλαμο καύσης στο κανάλι εξόδου για τη περαιτέρω ποσοτική και ποιοτική ανάλυσή τους μέσω κατάλληλων διατάξεων όπως το θερμιδόμετρο κώνου (cone calorimeter), το φασματοσκόπιο υπέρυθρης ακτινοβολίας με μετασχηματισμό fourier (FT-IR) και το θερμοβαρύμετρο (TGA). Ωστόσο προκύπτει ένα κατασκευαστικό πρόβλημα το οποίο απαιτεί μια λειτουργική λύση, αφού το προφίλ του θαλάμου καύσης έχει πλάτος 400 [mm] και ύψος 100 [mm], ενώ το κανάλι εξόδου είναι κυκλικής διατομής με διάμετρο τα 100 [mm].

Αρχικά στο κανάλι εξόδου θα συγκολληθεί μια μεταλλική τετράγωνη φλάντζα διαστάσεων 100[mm]x 100 [mm] προκειμένου να διαμορφωθεί το προφίλ του αγωγού εξόδου κατάλληλα ώστε να μην υπάρχει απώλεια ρευστού κατά την διέλευσή του. για την σύνδεση των δυο κομματιών θα χρησιμοποιηθεί ένας συγχύτης, ο οποίος θα οδηγεί τα καπναέρια από το θάλαμο καύσης και με τη σταδιακή μείωση των διαστάσεων του θα απορρίπτει το ρευστό στο αγωγό εξόδου. Μέσω της σταδιακής μείωσης των διαστάσεων του συγχύτη κατά μήκος της ροής επιτυγχάνεται η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού , αφού

πριν είχε μειωθεί η ταχύτητά του βρισκόμενο στον θάλαμο καύσης. Όμως στη χρήση του συγγύτη εγκυμονείται ένα ελάττωμα το οποίο προκύπτει από την ευαισθησία που παρουσιάζει η συσκευή σε ανομοιόμορφες ροές στην είσοδό του. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε στην είσοδο της συσκευής θα τοποθετηθούν οδηγία πτερύγια για την ομαλοποίηση της ροής και την κατεύθυνσή της στον αγωγό εξόδου. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συγγύτη θα είναι όμοια με αυτήν της αντίστοιχης συσκευής του διαχύτη που συνδέει τον αγωγό εισόδου με τον θάλαμο καύσης.

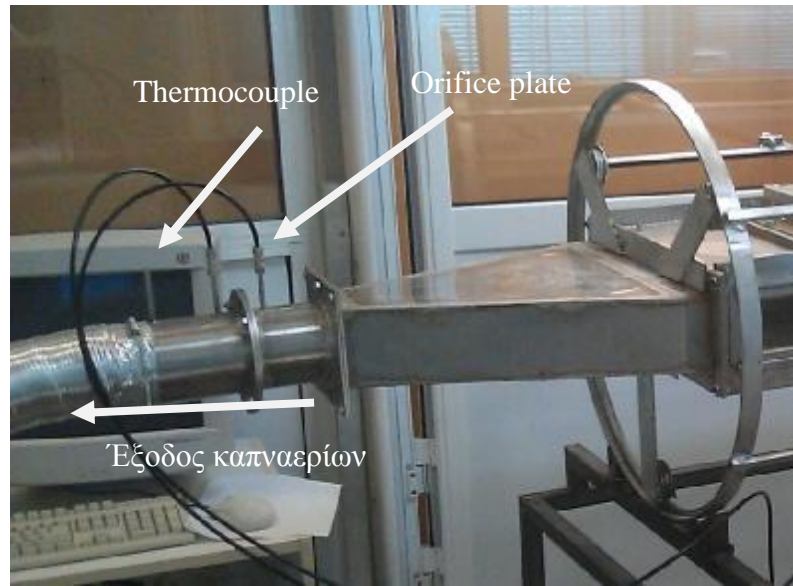


Σχήμα 4.14: Σχηματική άποψη συσκευής συγγύτη

4.6 ΚΑΝΑΛΙ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΕΡΑ

Η τελευταία συσκευή για να πάρει η πειραματική διάταξη την τελική της μορφή είναι το κανάλι εξόδου. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα μέρη της εργασίας αυτής, η πειραματική συσκευή θα κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη της να ελέγχει και να μεταβάλλει ανά πάσα στιγμή τις συνθήκες εισόδου και εξόδου του ρευστού. Με γνώμονα τη προαναφερθείσα κατεύθυνση ο αγωγός εξόδου θα είναι κατασκευαστικά όμοιος με τον αγωγό εισόδου και θα φέρει τα ίδια μετρητικά όργανα για τον έλεγχο της ροής. Τα εγκατεστημένα μετρητικά όργανα είναι ο μετρητής διαφορικής πίεσης και ο μετρητής θερμοκρασίας.

Ο πρώτος παρέχει τον έλεγχο της παροχής εξόδου με σκοπό η παροχή του ρευστού να μην υπερβαίνει τη κρίσιμη μέγιστη τιμή $Q_{\max} = 0,024 \left[\frac{m^3}{\text{sec}} \right]$, που μπορεί να δεχτεί το θερμιδόμετρο κώνου και να την επεξεργαστεί αποτελεσματικά. Ενώ ο δεύτερος μετρητής χρησιμοποιείται για τη καταγραφή της θερμοκρασίας εξόδου ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διόρθωση της ροής. Καθώς ο αέρας εισέρχεται στον αγωγό εισόδου θα έχει μια θερμοκρασιακή τιμή A και διερχόμενος από το θάλαμο καύσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν εκεί η θερμοκρασία του θα αυξηθεί και θα μεταβληθεί σε B . Κατ' αυτό τον τρόπο η θερμοκρασία εισόδου θα είναι διαφορετική από την θερμοκρασία εξόδου, έτσι η τιμή θα διορθωθεί μέσω του θερμοκρασιακού μετρητή στον αγωγό εξόδου. Τέλος τα καπναέρια θα οδηγηθούν στις κατάλληλες συσκευές για την ποσοτική και ποιοτική τους ανάλυση.



Εικόνα 4.9: Μορφή αγωγού εξόδου με τις οπές μέτρησης θερμοκρασίας και πίεση.

4.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ (FIELDPOINT)

Η πειραματική συσκευή αποτελείται από αρκετές μετρητικές συσκευές, όπως τα θερμοζεύγη, ο μετρητής διαφορικής πίεσης, το θερμαντικό πάνελ κλπ., των οποίων η λειτουργία τους πρέπει να ελέγχεται και να εποπτεύεται άμεσα από το χειριστή της συσκευής. Για αυτό το λόγο πρέπει να δημιουργηθεί μια ολοκληρωμένη αυτοματοποιημένη διαδικασία για τη λήψη, διαμόρφωση και καταγραφή των δεδομένων βασισμένη σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή εξοπλισμένο με κατάλληλο λειτουργικό πρόγραμμα (software). Τη λύση δίνει η δημιουργία ενός συστήματος FieldPoint για την επίτευξη των επιθυμητών ενεργειών. Το σύστημα θα αποτελείται από τη βασική μονάδα η οποία είναι κατάλληλα κατασκευασμένη να δέχεται τη σύνδεση μέχρι εννέα υπομονάδων, ενώ η μεταφορά των δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω της σειριακής τους σύνδεση με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή παρέχοντας μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Οι υπομονάδες που θα απαρτίζουν το σύστημα ελέγχουν είναι τρεις και ο καθένας χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των μετρητών θερμοκρασίας, διαφορικής πίεσης και θερμαντικού πάνελ. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στη συνέχεια τα λεπτομερή χαρακτηριστικά της κάθε μονάδας.

§ Βασική Μονάδα

Η βασική μονάδα FP-1000 της National Instruments παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλες εννέα υπομονάδες σε μια σειριακή σύνδεση. Η ανταλλαγή δεδομένων της μονάδας με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου Software όπως το LabView, το Measurement Studio κτλ. Το FP-1000 επιτρέπει στο χειριστή του να ελέγχει και να διορθώνει τυχόν σφάλματα που έχουν προκύψει στο δίκτυο. Η λειτουργία του επιτυγχάνεται μέσω 11 έως 30 Volts DC, και στη συνέχεια τη διανέμει στις υπόλοιπες υπο μονάδες.



Εικόνα 4.10 : Αποψη βασικής μονάδας FP-1000 (www.ni.com).

Πίνακας 4.14: Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας FP-1000

Network	
Serial ports	
FP-1000	1 RS-232 port, 1 RS-485 repeater port
FP-1001	1 RS-485 port
Baud rates	300, 1200, 2400, 9600, 38400, 57600, 115200 (switch selectable)
Communication parameters	1 start bit, 8 data bits, 1 stop bit, no parity
Integrity	Standard Optomux checksum
Maximum distance from host	
FP-1000 (RS-232)	15 m (50 ft)
FP-1001 (RS-485)	1,200 m (4,000 ft)
RS-485 isolation	2,300 V _{rms} breakdown
Power Requirements	
Power supply range	11 to 30 VDC
Recommended power supply	
FP-1000/1001 with up to 5 I/O modules	15 W (FP-PS-4 or equivalent)
FP-1000/1001 with 6 to 9 I/O modules	20 W
Power consumption	1 W + 1.15 (I/O module power requirements)

§ Υπομονάδα ελέγχου αισθητηρίου πίεσης

Η υπομονάδα FP-AL-110 της National Instruments χρησιμοποιείται για τη καταγραφή ενός εύρους τάσεων από το φάσμα των millivolts μέχρι το φάσμα των 120 Volts και συνήθως εφαρμόζεται για μετρήσεις σε διάφορους αισθητήρων. Η ανάλυση της ADC της μονάδας είναι τα 16 bits ενώ φέρει και 8 κανάλια σύνδεσης μετρητικών σημάτων. Στη περίπτωση μας η συσκευή θα χρησιμοποιηθεί για τη καταγραφή των σημάτων του μετρητή διαφορικής πίεσης.

**Εικόνα 4.11:** Άποψη μονάδας FP-AL-110 (www.ni.com)

Πίνακας 4.15: Τεχνικά χαρακτηριστικά υπομονάδας FP-AL-110.

Input Characteristics	
Number of inputs	
[c]FP-AI-100, [c]FP-AI-102, [c]FP-AI-110	8 single-ended
[c]FP-AI-111	16 single-ended
ADC resolution	
[c]FP-AI-110, [c]FP-AI-111	16 bits, 1 in 65,536
[c]FP-AI-100, [c]FP-AI-102	12 bits, 1 in 4,096
Filters	
[c]FP-AI-110, [c]FP-AI-111	50, 60, or 500 Hz, software configurable per channel
[c]FP-AI-100, [c]FP-AI-102	170 Hz, first-order analog filter
NMR ([c]FP-AI-110 and [c]FP-AI-111 only) ...	95 dB (at 50/60 Hz, with filter enabled)
Input impedance, voltage inputs	
[c]FP-AI-100	1.5 M Ω
[c]FP-AI-102	1 M Ω
[c]FP-AI-110	100 M Ω
Input impedance, current inputs	100 Ω
Overvoltage protection (voltage inputs only)	
[c]FP-AI-100, [c]FP-AI-102	250 V
[c]FP-AI-110	40 V
Overcurrent protection (current inputs only) ...	30 mA
Power Requirement	
Power from network module	
[c]FP-AI-110, [c]FP-AI-111	350 mW
[c]FP-AI-100, [c]FP-AI-102	400 mW

§ Υπομονάδα ελέγχου θερμοκρασιακών αισθητηρίων

Η υπομονάδα FP-TC-120 της National Instruments χρησιμοποιείται για τη καταγραφή των σημάτων που προέρχονται από θερμοκρασιακούς αισθητήρες. Στη περίπτωση μας, χρησιμοποιείται για τη καταγραφή των θερμοκρασιακών τιμών στην είσοδο και στην έξοδο του αγωγού εισαγωγής και εξαγωγής αντίστοιχα και των θερμοκρασιακών τιμών των θερμοζευγών που βρίσκονται στο κάτω μέρος του δοκιμίου. Η υπομονάδα φέρει 8 κανάλια σύνδεσης ενώ η ανάλυση της ADC είναι 16 bits. Το ηλεκτρικό σήμα των μετρητών thermocouple τύπου K ανέρχεται σε millivolts.



Εικόνα 4.12: Άποψη υπομονάδας FP-TC-120 (www.ni.com)

Πίνακας 4.16: Τεχνικά χαρακτηριστικά υπομονάδας FP-TC-120

Input Characteristics	
Number of inputs	8
ADC resolution	16 bits, 1 in 65 536
Type of ADC.....	Delta-sigma
Filters	50/60 Hz rejection
Excitation current	
[c]FP-RTD-122	0.25 mA
[c]FP-RTD-124	2 mA
Data scaling options:	
[c]FP-TC-120	Temperature (°C, °F, °K) or mV
[c]FP-RTD-122/124	Temperature (°C, °F, °K) or resistance (Ω)
Update period, all channels	
[c]FP-TC-120	1.13 s
[c]FP-RTD-122/124	1.08 s
Signal input bandwidth.....	3 Hz
Cold-junction accuracy ([c]FP-TC-120 with FP-TB-3 terminal base or cFP-CB-3 connector block)	
	0.25 °C typ, 0.5 °C max
Input impedance ([c]FP-TC-120)	20 MΩ
Input current ([c]FP-TC-120).....	35 nA typ, 140 nA max
Input noise.....	±1 LSB _{pp}
Overvoltage protection ([c]FP-TC-120 only).....	±40 V
Common-mode voltage referenced to isolated ground	
[c]FP-TC-120	1 V
[c]FP-RTD-122/124	2 V

§ Υπομονάδα ελέγχου θερμαντικού πάνελ

Η υπομονάδα FP-RLY-420 της National Instruments χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του θερμαντικού πάνελ. Σε γενικές γραμμές η εν λόγω υπομονάδα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σημάτων από χαμηλά Voltsμέχρι 125 Volts DCκαι μέχρι 250 Volts ACκαι γενικότερα σε εφαρμογές ελέγχου συστημάτων ισχύος.



Εικόνα 4.13 : Άποψη υπομονάδας FP-RLY-420 (www.ni.com).

Πίνακας 4.17 : Τεχνικά χαρακτηριστικά υπομονάδας FP-RLY-420.

Relay Characteristics	
Number of channels	
FP-RLY-420	8
FP-RLY-422	4
Relay type	
FP-RLY-420	SPST, normally open, nonlatching
FP-RLY-422	SPDT, nonlatching
Maximum switching capacity (resistive load) ¹	
AC	3 A at 250 VAC
DC	3 A at 35 VDC
	2 A at 40 VDC
	1 A at 55 VDC
	0.4 A at 120 VDC
Minimum switching load	10 mA at 5 VDC
Off-state leakage current (120 VDC/250 VAC)	
DC	0.12 μ A
50/60 Hz	8 μ A
DC path resistance	
Initial	\leq 150 m Ω
End of life	\geq 1.0 Ω
Expected relay life	
Mechanical	2 x 10 ⁷ operations/s (FP-RLY-420)
	1 x 10 ⁷ operations/s (FP-RLY-422)
Electrical (at 30 cpm)	300,000 operations at 3 A, 35 VDC
	100,000 operations at 3 A, 250 VAC
Operate time	
FP-RLY-420	<10 ms
FP-RLY-422	10 ms typ, 13 ms max
Release time	
FP-RLY-420	<10 ms
FP-RLY-422	5 ms typ, 7 ms max
Bounce time	
FP-RLY-420	<4 ms
FP-RLY-422	3 ms typ, 6 ms max
Contact material	
FP-RLY-420	Gold-plated silver cadmium oxide
FP-RLY-422	Silver cadmium oxide
Power Requirement (from Network Module)	
FP-RLY-420	2.5 W
FP-RLY-422	1.5 W



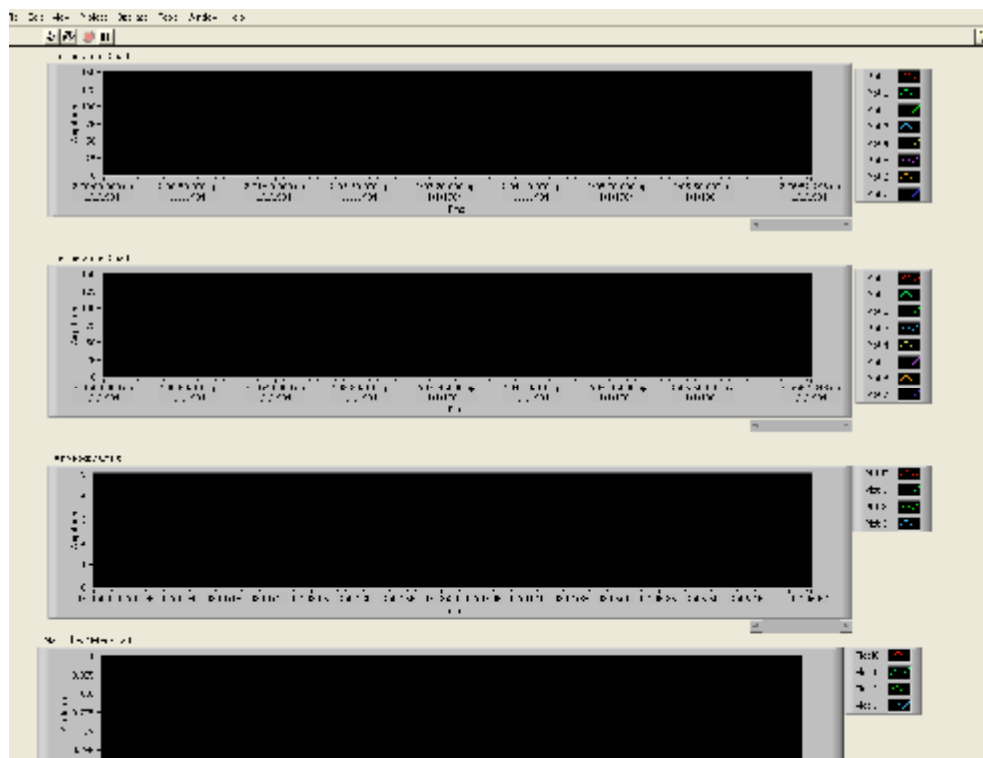
Εικόνα 4.14 : Διάταξη ελέγχου FieldPoint



Εικόνα 4.15 : Παράταξη συσκευής FieldPoint με τον Η/Υ.



Εικόνα 4.16 : Αποψη περιβάλλοντος λειτουργικού προγράμματος (software)



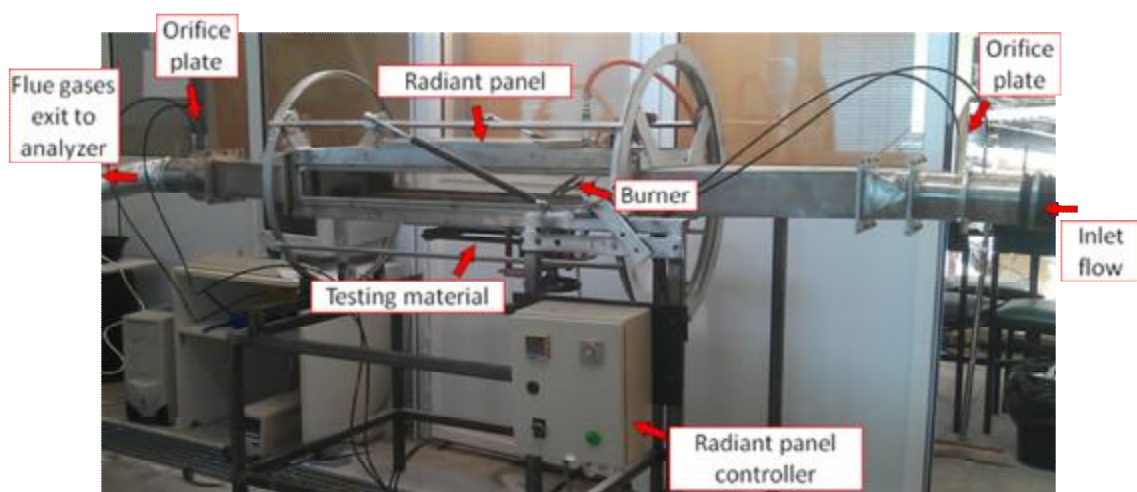
Εικόνα 4.17: Περιβάλλον λειτουργικού προγράμματος για τον έλεγχο μετρητών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

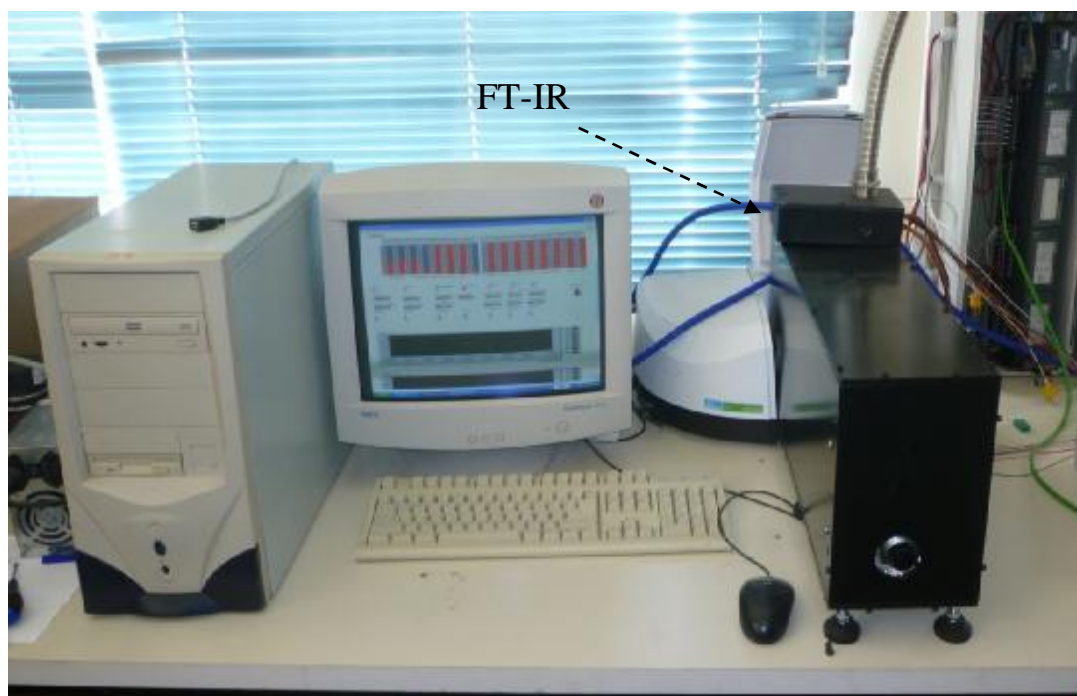
Με την ολοκλήρωση της κατασκευής της πειραματικής διάταξης θα διεξαχθούν δυο δοκιμές υλικών, ενός ξύλινου υλικού και ενός μονωτικού υλικού, προκειμένου να εκτιμηθεί η ετοιμότητα και η αποτελεσματικότητα της συσκευής. Οι μετρητικές διατάξεις που συμβάλλουν στην εξαγωγή σημαντικών παραμέτρων στη καύση των υλικών κάτω από ελεγχόμενες και προκαθορισμένες συνθήκες παρέχονται από το καλορίμετρο κώνου και το φασματοσκόπιο υπέρυθρης ακτινοβολίας με μετασχηματισμό fourier, FT-IR. Η διάταξη είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για να επιτρέπει στα προϊόντα της καύσης τη περαιτέρω ποιοτική και ποσοτική ανάλυσή τους μέσω των μετρήσεων του ρυθμού θερμικής απελευθέρωσης, της παραγωγής καπνού και τη ποσοστιαία παραγωγή μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 5.1: Διάταξη πειραματικής συσκευής



Εικόνα 5.2 : Καλορίμετρο Κώνου (Cone Calorimeter)



Εικόνα 5.3: Άποψη συσκευής FT-IR.

5.2 ΔΟΚΙΜΗ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά που θα δοκιμαστούν προκειμένου να εκτιμηθεί η θερμική τους συμπεριφορά είναι, ένα ξύλο πάνελ MDF ενώ το δεύτερο υλικό είναι ένα μονωτικό πάνελ. Πριν τη διεξαγωγή του πειράματος πρέπει να προκαθοριστούν οι παράμετροι του πειράματος. Οι εν λόγω παράμετροι αναφέρονται στο προσανατολισμό του υλικού, στην ένταση ακτινοβολίας του θερμαντικού πάνελ, το χρόνο προθέρμανσης του υλικού και τη διάρκεια της λειτουργίας του φλόγιστρου. Αφού προσδιοριστούν όλοι οι παράμετροι τότε δε μένει τίποτε άλλο από την έναρξη των δοκιμών και τη παρουσίαση των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

5.2.1 Ξύλινο πάνελ

Το υπο δοκιμή ξύλινο πάνελ από MDF έχει πάχος 8 [mm], και θα ακτινοβοληθεί face up από το θερμαντικό πάνελ. Η ένταση της θερμικής ισχύος που θα θερμάνει το ξύλινο πάνελ ορίζεται στα 15 [kW/m²] και θα διαρκέσει περίπου 1,5 [min]. Με το πέρας των 1,5 λεπτών ενεργοποιείται το φλόγιστρο για 30 [sec] και μετά διακόπτεται η λειτουργία του. Σκοπός της δοκιμής είναι αν θα εμφανιστεί και θα εξελιχθεί εστία φωτιάς επάνω στο υλικό και αν αυτή η φωτιά θα καταφέρει να το διαπεράσει.

Πίνακας 5.1: Δεδομένα πρώτης δοκιμής

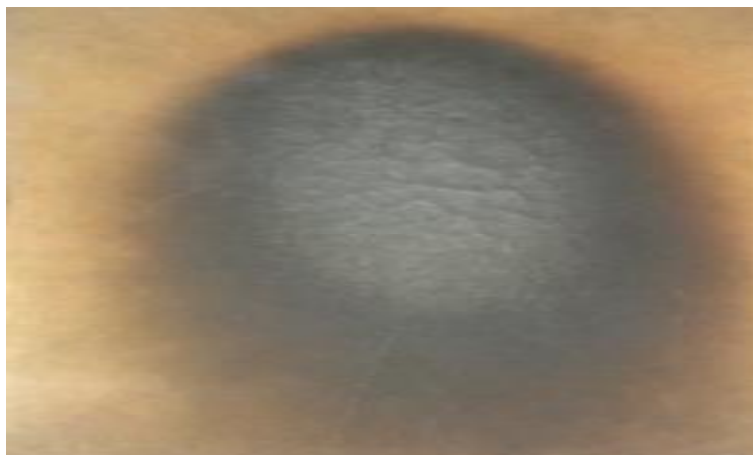
Υλικό	Ξύλο-MDF
Πάχος	8 [mm]
Προσανατολισμός υλικού	Face up
Ένταση ακτινοβολίας θερμοπομπού	15 [kW/m ²]
Χρόνος προθέρμανσης	1,5 [min]
Διάρκεια φλόγιστρου	30 [sec]
Επίτευξη ανάφλεξης	Ναι



Εικόνα 5.4: Εξέλιξη φωτιάς μετά την διακοπή της λειτουργίας του φλόγιστρου.

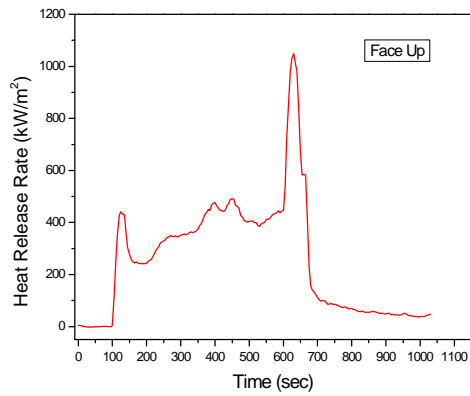


Εικόνα 5.5 : Αποψη υλικού πριν τη καύση του.

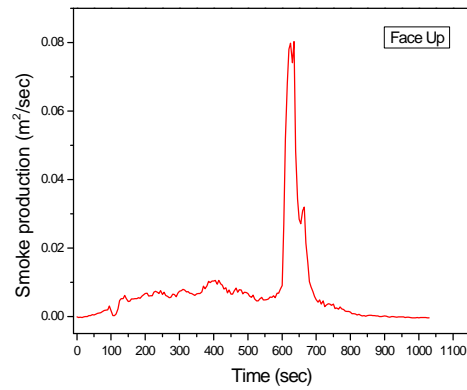


Εικόνα 5.6 : Άποψη υλικού μετά την φωτοβόληση του.

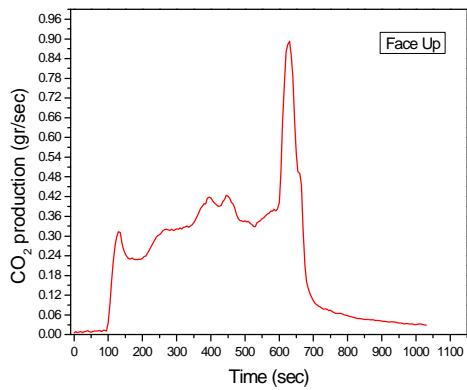
Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το υλικό δε κατάφερε να αποτρέψει την εμφάνιση φωτιάς κατά μήκος του με αποτέλεσμα το υλικό να καταστραφεί. Στη συνέχεια έλαβαν χώρα και οι επιθυμητές θερμικές μετρήσεις της καύσης.



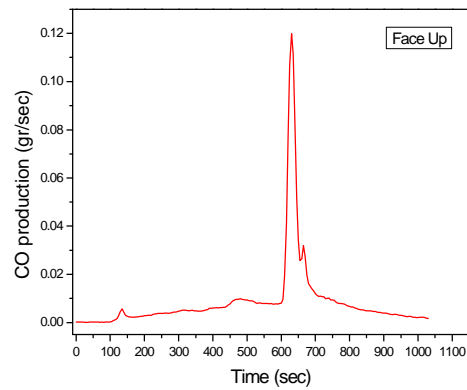
Σχήμα 5.1a: Χρονική εξέλιξη ολικής θερμικής απελευθέρωσης.



Σχήμα 5.1b: Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.



Σχήμα 5.1c: Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 5.1d: Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.

5.2.2 Μονωτικό πάνελ

Το υπο δοκιμή μονωτικό πάνελ έχει πάχος 12 [mm], και θα ακτινοβοληθεί faceup από το θερμαντικό πάνελ όμως στη περίπτωση αδυναμίας εμφάνισης φωτιάς σε αυτό το προσανατολισμό τότε θα αλλάξει ο προσανατολισμός και θα ακτινοβοληθεί facedown. Η ένταση της θερμικής ισχύος που θα θερμάνει το ξύλινο πάνελ ορίζεται στα 15 [kW/m²] και θα διαρκέσει περίπου 1,5 [min]. Με το πέρας των 1,5 λεπτών ενεργοποιείται το φλόγιστρο για 60 [sec], αφού πρόκειται για μονωτικό υλικό, και μετά διακόπτεται η λειτουργία του. Σκοπός της δοκιμής είναι αν θα εμφανιστεί και θα εξελιχθεί εστία φωτιάς επάνω στο υλικό και αν αυτή η φωτιά θα καταφέρει να το διαπεράσει.

Πίνακας 5.2: Δεδομένα δεύτερης δοκιμής

Υλικό	Μονωτικό
Πάχος	12 [mm]
Προσανατολισμός υλικού	Faceup
Ένταση ακτινοβολίας θερμοπομπού	15 [kW/m ²]
Χρόνος προθέρμανσης	1,5 [min]
Διάρκεια φλόγιστρου	60 [sec]
Επίτευξη ανάφλεξης	Όχι



Εικόνα 5.7: Έναρξη της λειτουργίας του φλόγιστρου με προσανατολισμό faceup.



Εικόνα 5.8 : Άποψη υλικού πριν τη καύση του



Εικόνα 5.9 : Άποψη υλικού μετά την φωτοβόληση του

Στη περίπτωση δοκιμής του μονωτικού υλικού, παρατηρήθηκε ότι η φωτιά δεν εξελίχθηκε στην επιφάνεια του υλικού όταν ακτινοβολήθηκε με προσανατολισμό faceup. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε το υλικό θα ακτινοβοληθεί με προσανατολισμό facedown, χωρίς ωστόσο να αλλάξουν τα δεδομένα διεξαγωγής του πειράματος.

Πίνακας 5.3: Δεδομένα τρίτης δοκιμής

Υλικό	Μονωτικό
Πάχος	12 [mm]
Προσανατολισμός υλικού	Face down
Ένταση ακτινοβολίας θερμοπομπού	15 [kW/m ²]
Χρόνος προθέρμανσης	1,5 [min]
Διάρκεια φλόγιστρου	60 [sec]
Επίτευξη ανάφλεξης	Όχι



Εικόνα 5.10: Έναρξη λειτουργίας φλόγιστρου με προσανατολισμό facedown.

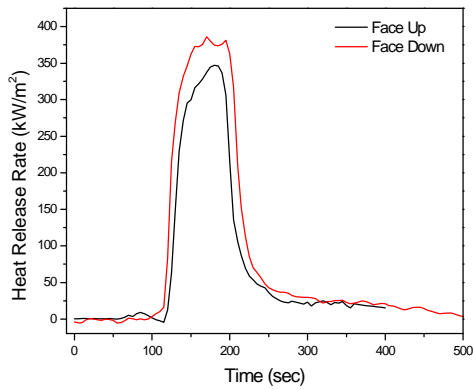


Εικόνα 5.11 : Άποψη υλικού πριν τη καύση του.

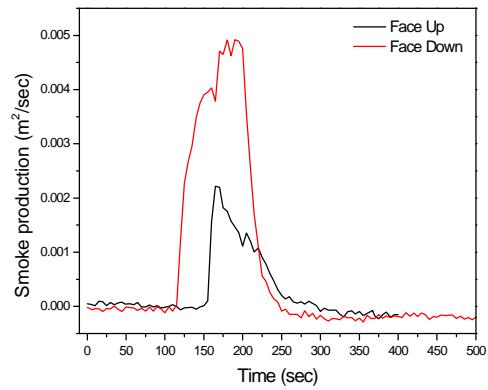


Εικόνα 5.12 :Άποψη υλικού μετά την φωτοβόληση του.

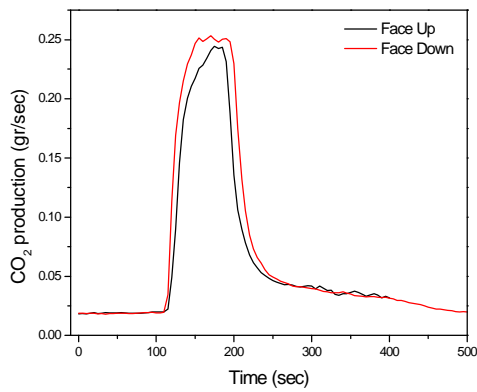
Όπως και στον προσανατολισμό face up έτσι και στον face down στο υλικό δεν εξελίχθηκε εστία φωτιάς, συγκριτικά με το ξύλινο πάνελ το οποίο κάηκε ολοσχερώς, καθιστώντας το ένα υλικό ικανό να αποτρέψει την εμφάνιση φωτιάς στις εν λόγω συνθήκες μελέτης. Μεγάλες διαφορές προκύπτουν από την ανάλυση των χαρακτηριστικών της καύσης του υλικού συγκριτικά με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του ξύλινου πάνελ.



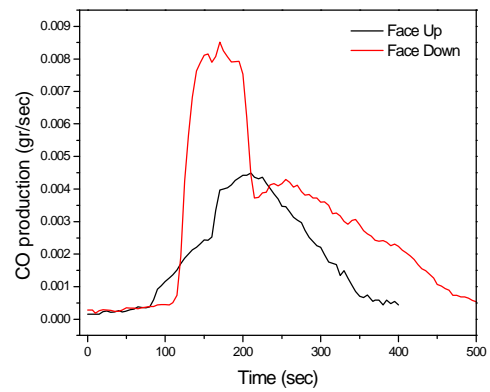
Σχήμα 5.13a: Χρονική εξέλιξη ολικής θερμικής απελευθέρωσης.



Σχήμα 5.13b: Χρονική εξέλιξη παραγωγής καπνού.



Σχήμα 5.13c: Χρονική εξέλιξη παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 5.13d: Χρονική εξέλιξη παραγωγής μονοξειδίου του άνθρακα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αθανάσιος Α. Αργυρίου, 'Αισθητήρες Ημιαγωγών, Αισθητήρες θερμικοί, μηχανικοί, μαγνητικοί, αισθητήρες ακτινοβολίας και χημικοί αισθητήρες', Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2004.
2. Ε.Ι. Καμίτσος, Γ.Δ. Χρυσικός, Στοιχεία φασματοσκοπίας Υπερύθρου, Ινστιτούτο Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, 1999.
3. R.G.W. Cherry and Associates, A Benefit Analysis for Enhanced Protection from fires in Hidden Areas on Transport Aircraft, CAA paper 2002/01, FAA reference POT/FAA/AR-02/50.
4. M. Wilhelm, Aircraft applications, ASM Handbook, Vol. 21: composites, ASM International, 2001.
5. Mouritz A.P., Fire safety of advanced composites for aircraft, ATSB Research and Analysis Report, 2006.
6. Boeing 2005, Statistical summary of commercial jet airplane accidents-worldwide operations 1959-2004, Seattle, Washington, US.
7. Mclean B, Glicksberg S and Coulliard K, Qualification and certification of a new aerospace material with FAA fire property requirements, SAMPLE Journal, Vol. 40, (Sept/Oct), pp. 6-12, 2004.
8. Lyon R.E., Fire-Resistant Materials: Research overview, FAA office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-97/99, 1997.
9. Cherry R., Warren K., Fuselage burn through protection for increased post crash occupant survivability: Safety benefit analysis based on past accident, FAA Office of Aviation Research, DOT/FAA/AR-99/57, 1999.
10. International Organization for Standardization, Aircraft, Environmental Conditions and Test Procedures for Air borne Equipment – Resistance to Fire in Designed fire Zones, ISO 2685 : 1998 (E), 1998.
11. Gibson A.G., Dodds N., Davies J.M., Fire behavior of composite laminates Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Vol. 31 ; 7: 698-702, 2000.
12. Market T.R., A Preliminary Examination of the Effectiveness of Hand-Held Extinguishers Against Hidden fires in the Cabin Overhead Area of Narrow – Body and Wide – Body Transport Aircraft, Technical note, FAA, DOT/FAA/AR-TN04133, 2007.
13. Fereres S. et al., Mass flux at ignition in reduced pressure environments, combustion and flame, doi: 10.1016/j.combustflame.2010.11.013,2011.
14. Ochs R.I., Development of a flame Propagation Test Method for Structural composite Materials in inaccessible Areas, The Sixth Triennial International fire and cabin Safety Research Conference, Atlantic City, NJ, USA, 2010.
15. Hill R., Cargo Fire Suppression by Depressurization, The Sixth Triennial International Fire & Cabin Safety Research Conference, Atlantic City, NJ, USA, 2010.
16. International Organisation for Standardisation, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conducts running full –

- Part 2: Orifice plates, ISO 5167-2:2003.
17. International Organisation for Standardisation, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conducts running full – Part 1: General Principles and requirements, ISO 5167-2:2003.
 18. Reader – Harris, M.J. and SATTARY, J.A. The orifice plate discharge coefficient equation – the equation for ISO 5167-1. In Proc. of 14th North Sea flow Measurement Workshop, Peebles, Scotland, East kilbride.
 19. Reader-Harris, M.J, The equation for the expansibility factor for orifice plates, In Proc. of FLOMEKO 98, Lund, Sweden, June 1998, pp. 209-214.
 20. Nicholas J.V., White D.R., Traceable Temperatures-An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, John Wiley and Sons, 1994.
 21. Morris A.S., Principles of Measurements and Instrumentation, Prentice Hall, New York, 1993.
 22. Griffiths, P.R., de Haseth J.A., Fourier Transform Infrared Spectroscopy, Wiley and Sons, New York, 1986.
 23. Johan Lindholm, Anders Brink, Mikko Hupa, Cone calorimeter-A tool for measuring Heat release rate, Abo Akademi Process Chemistry Centre, 2001.
 24. Mairitz A.P., Gibson A.G., Fire properties of polymer composite materials, Solid Mechanics and its applications, Springer, 2006.
 25. V. Babrauskas, ‘Why was the fire so big? HRR : The role of the heat release rate in described fires ’, fire and Arson Investigator, 1997; 47:54-57.
 26. A.G. Gibson and J. Hume, Fire performance of composite panels for large marine structures, Plastics, Rubbers and Composites Processing and Applications, 1995; 23:175-183.
 27. G.T. Egglestone and D.M. Turley, Flammability of GRR for use in ship superstructures, fire and Materials, 1994; 18:255-260.
 28. E.D. Weil, M.M. Hirschler, N.G. Patel, M.M. Said and S. Shakir, Oxygen index: correlations to other fire tests, fire and Materials, 1992; 16:159-167.
 29. U. Sorathia, Flammability and fire safety of composite materials, Proceedings of the 1st International Workshop on composite materials for offshore operations, Houston, Texas, 26-28 Oct 1993, p.309-327.
 30. D.M. Allison, A.J. Marchand and R.M. Morchat, Fire performance of composite materials in ships and offshore structures, Marine Structures, 1991; 4:129-140.
 31. J.E. Brown, E. Braun and W.H. Twilley, Cone calorimeter evaluation of the flammability of composite materials, NBS Report NBSIR 88-3733, 1988.
 32. J. Hume, Assessing the fire performance characteristics of GRP composites, International Conference on Materials and Design Against fire, London, 1992, p.11-15.
 33. J.R. Brown and Z. Mathys, Reinforcement and matrix effects on the combustion properties of glass reinforced polymer composites, Composites, 1997; 28A:675-681.
 34. E.M. Sparrow, J.P. Abraham, W.J. Minkowycz, Flow separation in a diverging conical duct: Effect of Reynolds number and divergence angle, International Journal of Heat and Mass Transfer, February 2009.
 35. A.T. Grenier, N.A. Dembsey and J.R. Barnett, Fire characteristics of cored composite materials for marine use, Journal of fire Safety , 1998; 30:137-159.
 36. M. Le Bras, S. Bourbigot, B. Mortaigne and G. Cordellier , Comparative study of the fire behavior of glass-fiber reinforced unsaturated polyester using a cone calorimeter, Polymers and Polymer Composites, 1998; 6:535-539.
 37. D.A. Kourtides, W.J. Giwee and J.A. Parler, Thermal response of composite panels, Poly. Eng. and Sci., 1979; 19:226-231.
 38. D.P. Macaione, R.P. Downing and P.R. Bergquist, Summary Report AMMRC TR 83-53,

-
- Army Materials and Mechanics Research Laboratory, Watertown, MA, 1983.
39. S.C. Bates and P.R. Soloman, Elevated temperature oxygen index apparatus and measurements, *Journal of fire Science*, 1993; 11:271-284.
 40. S.B. Sastri, J.P. Armistead, T.M. Keller and U. Sorathia, Flammability characteristics of phthalonitrile composites, *Proceedings of the 42th International SAMPE Symposium*. 4-8 May 1997, p. 1032-1038.
 41. M.J. Scudamore, Fire performance studies on glass-reinforced plastic laminates, *fire and Materials*, 1994; 18:313-325.
 42. J.R. Brown and N.A St John, Fire-retardant low-temperature-cured phenolic resins and composites, *TRIP*, 1996; 4:416-420.
 43. R.E. Lyon, J. Demario, RN. Walters and A. Crowley, Flammability of glass fiber-reinforced polymer composites, *Proceedings of the fourth conference on Composites in fire*, 15-16 September 2005, Newcastle-upon-Tyne, UK.
 44. A. Kootsookos and A.P. Mouritz, Fire reaction of polymer composites: effect of specimen thickness, *Composites A*.
 45. E. Mikkola and I.S. Wichmann, On the thermal ignition of combustible material, *fire and Materials*, 1989; 14:87-96.
 46. J.G. Quintiere, Surface flame spread, *SFPE Handbook of fire Protection Engineering*, ed. P.J. DiNenno, D. Drysdale, C.L. Beyler, W.D. Walton, R.L.P Custer, J.R Hall and J.M. Watts, Society of fire Protection Engineers, 200, p. 2-246 to 2-257.
 47. Mouritz A.P., Gibson A.G., *Fire Properties of polymer composites materials*, Solid Mechanics and its applications, Springer, 2006.
 48. M.M. Hirschler, Fire hazard and toxic potency of the smoke from burning materials, *Journal of fire Science*, 1987; 5:289-307.
 49. U. Sorathia, T. Dapp and J. Kerr, Flammability characteristics of composites for shipboard and submarine internal applications, *Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium*. San Diego, CA, 15-18 April 1991, p.1868-1878.
 50. M. R. Chowdhury, Determination of pressure loss and discharge coefficients for non-newtonian fluids in long square-edged orificies, July 2010.
 51. Frank M. White, *Fluid Mechanics*, Fourth Edition, WCB McGraw-Hill, University of Rhodes, 1998.
 52. Ιστότοπος Federal Aviation Administration, <http://www.faa.gov>, ημερομηνία προσπέλασης 21/01/2013.
 53. Βιβλιοθήκη αεροναυπηγικών υλικών, <http://www.redstar.gr>, ημερομηνία προσπέλασης 03/03/2013.
 54. Οργανισμός για την ασφάλεια των αεροπορικών πτήσεων, <http://www.flightsafety.org>, ημερομηνία προσπέλασης 15/03.2013.
 55. Εταιρεία κατασκευής μετρητής παροχής, <http://www.avcocalve.com>, ημερομηνία προσπέλασης 25/02/2013.

56. Εταιρεία κατασκευής και εμπορίας μετρητών διαφορικής πίεσης, <http://www.tradekorea.com>, ημερομηνία προσπέλασης 25/02/2013.
57. Ιστότοπος εμπορίας συστημάτων ελέγχου, <http://www.ni.com>, ημερομηνία προσπέλασης 19/03/2013.
58. Ιστότοπος εμπορίας μετρητικών αισθητήρων, <http://www.omega.com>, ημερομηνία προσπέλασης 08/05/2013.
59. Ιστότοπος εμπορίας θερμομονωτικών πλακών, <http://www.kmmb.gr>, ημερομηνία προσπέλασης 10/05/2013.
60. Κατασκευαστική εταιρεία υπέρυθρων θερμοπομπών, <http://www.solarproducts.com>, ημερομηνία προσπέλασης 22/06/2013.