



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ**  
**ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ**

**Τομέας IV**  
**Τομέας Σύνθεσης και Ανάπτυξης Βιομηχανικών Διαδικασιών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων (uncertainties) σε Πρότυπες**  
**Μεθόδους Ανάλυσης Αεροπορικών Καυσίμων**

**Σπουδάστρια : Μακρέλλη Μελαχροινή**  
**Επιβλέπων Αν. Καθηγητής : Ζαννίκος Φανούριος**

**ΑΘΗΝΑ**  
**Οκτώβριος 2011**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Υπολογισμός Αβεβαιοτήτων (uncertainties) σε Πρότυπες Μεθόδους Ανάλυσης Αεροπορικών Καυσίμων» εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011 στα πλαίσια της εκπαιδευτικής διαδικασίας στο Εργαστήριο Λιπαντικών της ΕΚΟ ΑΒΕΕ του ομίλου ΕΛ.ΠΕ .

Ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την πραγματοποίηση της εργασίας μου ήταν το άριστο κλίμα συνεργασίας με το προσωπικό του Εργαστηρίου και κυρίως με την προϊσταμένη Καματερού Μαρία. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον υπεύθυνο του θέματος Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Χημικών Μηχανικών κ. Ζαννίκο Φανούριο για την ανάθεση της εργασίας αυτής και την καθοριστική συμβολή του στην ολοκλήρωσή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Χημικό Μηχανικό Θεοδώρου Δημήτριο για την στήριξή του σε αυτήν την προσπάθεια καθώς και για την προθυμία του και την βοήθειά του σε κάθε ερώτηση ή πρόβλημα που προέκυπτε.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον Χημικό Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα Αλέξανδρο Δεληγιάννη για την βοήθεια και την στήριξή τους σε αυτήν την προσπάθεια.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την συμπαράστασή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένο, αλλά εξαρτάται από πολλές μη ελεγχόμενες επιδράσεις (ικανότητα του μετρολόγου, επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, ασταθής συμπεριφορά του οργάνου ή του μετρούμενου μεγέθους, κλπ). Επομένως, το επιζητούμενο αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί στοχαστική μεταβλητή και το αποτέλεσμα της ως προερχόμενο από ένα πιθανό σύνολο τυχαία διαμορφούμενο από τις μη ελεγχόμενες επιδράσεις. Η στοχαστική προσέγγιση της μέτρησης θεωρεί ότι, μη μπορώντας να ελέγξουμε τις επιρροές που διαμορφώνουν το εκάστοτε αποτέλεσμα, τα διάφορα αποτελέσματα αποτελούν δυνητικά συμβάντα μιας τυχαίας πειραματικής διαδικασίας.

Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση εννοιών στατιστικής και πιθανοτήτων, που θα δώσουν απάντηση στο ερώτημα: ποια είναι η πιθανότητα η αποσπασματική πληροφορία που διαθέτουμε (δηλαδή η μέτρηση-παρατήρηση) για μια πιο σύνθετη πραγματικότητα (δηλαδή την αληθή τιμή) να μην αποτελεί σύμπτωση, αλλά να δίνει πληροφορίες για την πραγματικότητα του εξεταζόμενου φαινομένου, ή αλλιώς, με βάση το αποτέλεσμα της μέτρησης και την κατανομή την οποία ακολουθεί το αποτέλεσμα αυτό, ποια η πιθανότητα η αληθής τιμή να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα.

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής ήταν η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις της πυκνότητας και του κινηματικού ιξώδους στα αεροπορικά καύσιμα, σύμφωνα με τις πρότυπες μεθόδους ASTM D 4052 και ASTM D 7042, σύμφωνα με την μεθοδολογία GUM (ISO / IEC Guide 98-3:2008 “Guide to the expression of uncertainty in measurement”). Για την επίτευξη του στόχου μας έπρεπε να καταγράψουμε τις εκάστοτε πηγές αβεβαιότητας για την κάθε μέτρηση και να υπολογίσουμε την συνεισφορά τους. Ο υπολογισμός απαιτεί την χρήση αρκετών και πολύπλοκων τύπων της Στατιστικής, η κατάσταση όμως γίνεται ακόμα δυσχερέστερη όταν έχουμε να συγκρίνουμε τιμές περισσότερων από δύο ομάδων μετρήσεων.

Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται μία πανίσχυρη γενική στατιστική δοκιμασία (στην πραγματικότητα οικογένεια δοκιμασιών) γνωστή ως **ανάλυση διακύμανσης** (*ANalysis Of VAriance*), γνωστότερη ως **ANOVA**. Γενικός σκοπός της ANOVA είναι η ανεύρεση και η στατιστική σύγκριση των επιμέρους πηγών διακύμανσης (ή αβεβαιότητας), που συνεισφέρουν στην ολική διακύμανση (ή αβεβαιότητα) αποτελέσματος το οποίο προκύπτει από συνδυασμό ομάδων μετρήσεων.

Έτσι , με την χρήση αυτού του εργαλείου παρατηρήθηκε ότι οι κύριες εισφορές αβεβαιοτήτων για τις δύο μεθόδους είναι το σφάλμα του οργάνου και το σφάλμα του εργαστηρίου , αφού οι μέθοδοι όντας ιδιαίτερα αυτοματοποιημένες δεν επηρεάζονται από την επίδραση του τυχαίου σφάλματος ( αναλυτή – περιβάλλοντος ).Όμως, το τελευταίο στις μετρήσεις της πυκνότητας, παρόλο που η ολική αβεβαιότητα δεν διαφέρει αρκετά μεταξύ των αντίστοιχων μετρήσεων, παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά στην ASTM D 7042 , γεγονός ανεπιθύμητο!

Επομένως , παρόλο που η μέτρηση με το ιξωδόμετρο της Stabinger μπορεί να θεωρεί μια ακριβής μέθοδος δεν προσεγγίζει την ακρίβεια εκείνης με το ψηφιακό πυκνόμετρο. Τέλος, για τον υπολογισμό του κινηματικού ιξώδους κρίνεται ακατάλληλη, διότι οι αβεβαιότητες της ως προς την εκτιμώμενη αγγίζει το ποσοστό του 4,5%.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΑΡΓΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ .....	8
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	8
1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ .....	8
1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΡΓΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ .....	9
1.4 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ .....	10
1.5 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ .....	11
1.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ .....	14
1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	16

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ .....	17
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
2.2 ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΕΣ BENZINEΣ.....	17
2.2.1 ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	19
2.3 ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ .....	19
2.3.1 ΤΥΠΟΙ-ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ .....	20

2.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ .....	26
2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
1. ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΙ ΣΤΡΟΒΙΛΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	49
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ – ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ .....	49
3.2 TURBOJET – TURBOFAN :ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ .....	50
3.2.1 TURBOJET: Η ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	50
3.2.2 Η ΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ TURBOFAN .....	53
3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
4.ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ .....	57
4.1 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	57
4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	57
4.1.2 ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	58
4.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	60

4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ .....	61
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	62
4.2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ.....	62
4.2.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ.....	63
4.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	69
4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	69
4.3.2 ΑΠΟ ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΗΝ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ .....	70
4.3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ.....	72
4.3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Α.....	74
4.3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Β.....	76
4.4 ΒΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	80
5.1 ΣΚΟΠΟΣ.....	80
5.2 ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ.....	81
5.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΑΚΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ .....	85
5.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ.....	90

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	112
--	-----

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 .....	115
-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 .....	121
-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 .....	124
-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4 .....	125
-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5 .....	126
-------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6 .....	127
-------------------	-----



## ***Κεφάλαιο 1***

### ***Αργό Πετρέλαιο***

#### **1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Ο όρος *πετρέλαιο*, που προέρχεται από την ελληνική λέξη πέτρα και τη λατινική *oleum*, αναφέρεται σε ένα σύνθετο μίγμα υδρογονανθράκων το οποίο απαντά στη γη σε αέρια, υγρή ή στερεή μορφή. Είναι γνωστό στον άνθρωπο από αρχαιότατους χρόνους. Έχουν αναφερθεί περιπτώσεις, στις οποίες άνθρωποι έβλεπαν «άσβεστες φλόγες» να βγαίνουν μέσα από τη γη, στις περιοχές του Περσικού Κόλπου και της Κασπίας Θάλασσας. Στην Παλαιά Διαθήκη αναφέρεται ότι ο Θεός είπε στο Νώε να επιχρίσει την Κιβωτό του εσωτερικά και εξωτερικά με άσφαλτο, ενώ άσφαλτος χρησιμοποιήθηκε και ως συνδετική ύλη στα τείχη της Ιεριχούς και τον Πύργο της Βαβέλ. Πιστεύεται ότι η καταστροφή των Σοδόμων και της Γομόρας οφείλεται σε ανάφλεξη αερίων που προέρχονταν από πετρελαιοπηγές.

Οι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν την άσφαλτο για την ταρίχευση των νεκρών. Οι αρχαίοι Έλληνες γιατροί Ιπποκράτης και Γαληνός καθώς και οι ερυθρόδερμοι της Βόρειας Αμερικής τη θεωρούσαν πολύτιμο φάρμακο. Τέλος, θεωρείται πως το «υγρό πυρ» είχε ως βάση το πετρέλαιο. [ 1],[2],[5]

#### **1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ**

Το πετρέλαιο είναι ένα υγρό ορυκτό που περιέχει εκατοντάδες ουσίες. Η μεγάλη πλειοψηφία των ουσιών αυτών είναι υγροί υδρογονάνθρακες στους οποίους είναι διαλυμένοι αέριοι και στερεοί υδρογονάνθρακες. Ο αριθμός των ατόμων του άνθρακα για τους υδρογονάνθρακες αυτούς κυμαίνεται μεταξύ 1 και 80, και μπορεί να είναι αλκάνια (παραφίνες), κυκλικοί υδρογονάνθρακες (ναφθένια) αλλά και αρωματικοί υδρογονάνθρακες.

Στο αργό πετρέλαιο περιέχονται ακόμα ενώσεις θείου (μερκαπτάνες, δισουλφίδια, θειοφαίνια κ.λπ.) και οξυγόνου (παραφινικά και ναφθενικά οξέα, φαινόλες, αιθέρες), άζωτο, μέταλλα σε πολύ μικρά ποσοστά και κυρίως υπό τη μορφή οργανομεταλλικών ενώσεων και αλάτων και, τέλος, θαλασσινό νερό.

Σημειώνεται ότι στο αργό πετρέλαιο δεν περιέχονται ακόρεστοι υδρογονάνθρακες και πως η παρουσία τους στα τελικά προϊόντα του πετρελαίου οφείλεται στις διυλιστηριακές διεργασίες παραγωγής τους. Στον Πίνακα 1-1 φαίνεται μια τυπική στοιχειακή ανάλυση αργού πετρελαίου. [1] ,[2].

Στοιχεία	Περιεκτικότητα
Άνθρακας	83,90 – 86,80
Υδρογόνο	11,40 – 14,00
Θείο	0,06 – 8,00
Άζωτο	0,11 – 1,70
Οξυγόνο	0,50
Μέταλλα ( Fe , V, Ni κ.λπ. )	0,03

Πίνακας 1-1: Γενικά χαρακτηριστικά αργών πετρελαίων

### 1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΡΓΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ

Η κατάταξη των αργών πετρελαίων σε κατηγορίες γίνεται με βάση την περιεκτικότητά τους σε παραφίνη και άσφαλτο.

Έτσι οι κατηγορίες των αργών πετρελαίων είναι :

1. *Πετρέλαια παραφινικής βάσης:* Τα πετρέλαια αυτά τα οποία έχουν μικρή πυκνότητα περιέχουν παραφίνη και ελαχίστη ή καθόλου άσφαλτο. Περιέχουν κυρίως παραφινικούς υδρογονάνθρακες με μικρή αναλογία ναφθενικών και ασήμαντη αρωματικών υδρογονανθράκων. Σημειώνεται πως αποδίδουν μεγάλο ποσοστό λιπαντικών.

2. *Πετρέλαια ασφαλτούχου βάσης (ναφθενικής βάσης) :* Τα πετρέλαια αυτά έχουν μεγάλη πυκνότητα.. Περιέχουν άσφαλτο και ελάχιστη ή καθόλου παραφίνη.

Αποτελούνται κυρίως από ναφθενικούς υδρογονάνθρακες αρκετούς αρωματικούς και λίγους παραφινικούς. Αποδίδουν μικρό ποσοστό λιπαντικών.

3. *Πετρέλαια μικτής βάσης* : Αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των αργών πετρελαίων – περίπου 90% . Αποτελούνται κι από άσφαλτο και παραφίνη και – όπως αναμένεται – έχουν ενδιάμεσες ιδιότητες .

Χρησιμοποιούνται επίσης και υπολογιστικές, παράμετροι για την κατάταξη των αργών πετρελαίων σε κατηγορίες. Οι παράμετροι (Watson Characterization Factor - CF-, Correlation Index -CI-) αυτές βασίζονται στην πυκνότητα των πετρελαίων και την περιεκτικότητά τους σε θείο.[1],[2]

<i>Ιδιότητες</i>	<i>Παραφινικής Βάσης</i>	<i>Ασφαλτούχου Βάσης</i>
Πυκνότητα	Χαμηλή	Υψηλή
Περιεκτικότητα σε νάφθα	Υψηλή	Χαμηλή
Αντικροτικότητα νάφθας	Χαμηλή	Υψηλή
Οσμή νάφθας	Ουδέτερη	Όξινο
Τάση κηροζίνης για καπνισμό	Χαμηλή	Υψηλή
Σημείο ροής λιπαντικών	Υψηλό	Χαμηλό
Περιεκτικότητα σε λιπαντικά	Υψηλή	Χαμηλή
Δείκτης ιξώδους λιπαντικών	Υψηλός	Χαμηλός

*Πίνακας 1-2: Γενικά χαρακτηριστικά αργών πετρελαίων<sup>[1]</sup>*

## 1.4 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ

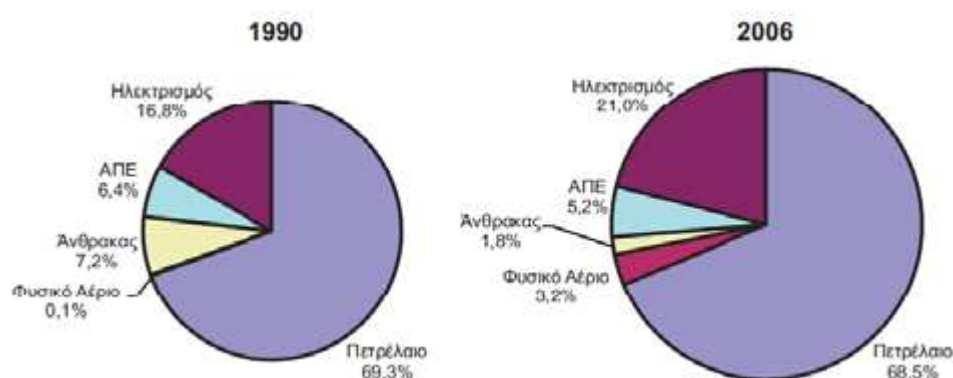
Έχουν προταθεί δύο είδη θεωριών για να εξηγήσουν την πρώτη ύλη και τον τρόπο από τον οποίο προήλθαν τα κοιτάσματα πετρελαίου. Είναι η θεωρία της ανόργανης προέλευσης και η θεωρία της οργανικής προέλευσης, Η περισσότερο αποδεκτή σήμερα θεωρία για τη δημιουργία του αργού πετρελαίου είναι αυτή της οργανικής προέλευσης. Σύμφωνα με αυτή, το πετρέλαιο δημιουργήθηκε από το πλαγκτόν των

θαλασσών καθώς και τους νεκρούς θαλάσσιους οργανισμούς που καθιζάνουν κατά καιρούς στον πυθμένα της θάλασσας. Η οργανική αυτή ύλη υπό συνθήκες υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών και, πιθανώς, υπό την επίδραση ραδιενεργού ακτινοβολίας μετατράπηκε στην καύσιμη ύλη που ονομάζουμε αργό πετρέλαιο

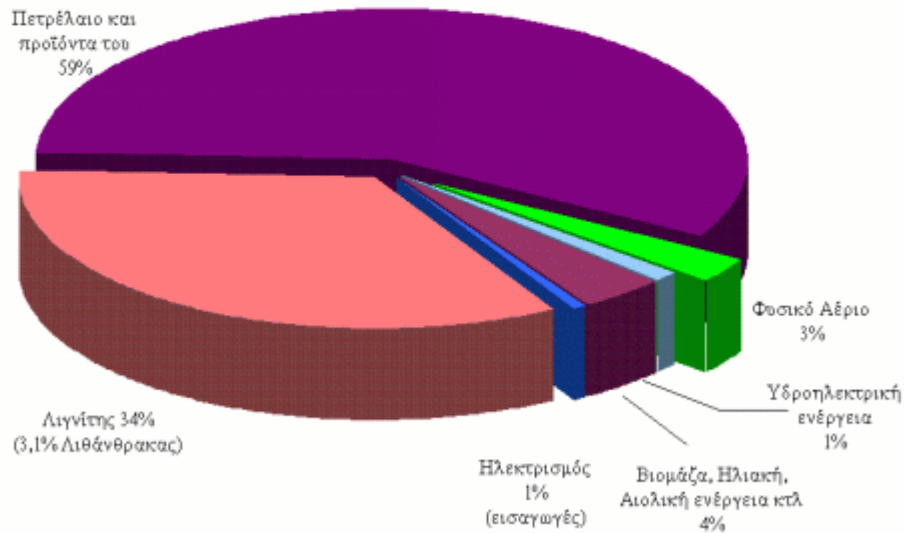
Δύο από τις σημαντικότερες θεωρίες ανόργανης προέλευσης του αργού πετρελαίου (οι οποίες σήμερα έχουν ξεπεραστεί), είναι αυτή του Mendelejeff , σύμφωνα με την οποία το πετρέλαιο δημιουργήθηκε από την επίδραση νερού σε ανθρακασβέστιο, και αυτή που υποστηρίζει ότι η δημιουργία του πετρελαίου οφείλεται στην επίδραση υδρατμών σε ηφαιστειογενή πετρώματα. [1],[2]

### **1.5 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ**

Παρά την τάση για εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, το πετρέλαιο παραμένει η βασική πηγή ενέργειας καλύπτοντας (όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1) το 68.5 % των αναγκών. Τα προϊόντα πετρελαίου αποτελούν βασικά καύσιμα τόσο για τις αναπτυγμένες όσο και τις αναπτυσσόμενες χώρες. Περισσότερες εξαρτώνται σε ποσοστό πάνω από 75% σε εισαγωγές πετρελαίου για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. [2], [4].



**Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας  
1998  
Σύνολο 26900 χιλ. ΤΠΠ**



*Σχήμα 1-1* : Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας

Η αυξημένη κατανάλωση προϊόντων πετρελαίου θα ήταν αναμενόμενο να συνοδεύεται, από διαρκή μείωση των υπαρχόντων αποθεμάτων πετρελαίου. Αντιθέτως όμως, κατά τα τελευταία χρόνια τα βεβαιωμένα αποθέματα διατηρούνται σε σταθερό επίπεδο. Το παραπάνω φαινόμενο οφείλεται αφενός στη συνεχή ανακάλυψη νέων κοιτάσματος και αφετέρου στη βελτίωση των τεχνικών ανάκτησης, που επιτρέπουν την ανάκτηση από πετρελαιοπηγές που θεωρούνταν εξαντλημένες με τις παλαιότερες τεχνικές ανάκτησης.

Στον Πίνακα 1-3 φαίνεται η διακύμανση των βεβαιωμένων αποθεμάτων πετρελαίου από το 1982 μέχρι το 2002. Η περιοχή της Μέσης Ανατολής διατηρεί, συνέχεια τον κύριο όγκο των αποθεμάτων. Σήμερα κατέχει το 65,4% του συνόλου των βεβαιωμένων αποθεμάτων, και ακολουθούν η Νότια-Κεντρική Αμερική (9,4%) και Ευρώπη-Ευρασία (9,3%). Αξιοσημείωτη είναι η αύξηση των βεβαιωμένων αποθεμάτων στην Αφρική, στη Νότια Αμερική και στη Μέση Ανατολή από το 1982

έως το 1992. Με βάση τα υπάρχοντα αποθέματα και τη σημερινή ζήτηση, το υπάρχον πετρέλαιο επαρκεί για 40 περίπου χρόνια ακόμη.

<b>Βεβαιωμένα Αποθέματα</b>	<b>1982</b>  (χιλ.εκ.Βαρέλια)	<b>1992</b>  (χιλ.εκ.Βαρέλια)	<b>2001</b>  (χιλ.εκ.Βαρέλια)	<b>2002</b>  (χιλ.εκ.Βαρέλια)	<b>Ποσοστό επί του συνόλου</b>
<i>Η.Π.Α</i>	35,1	32,1	30,0	30,4	2,9 %
<i>Βόρεια Αφρική</i>	91,6	90,9	63,5	49,9	4,8%
<i>Νότια και Κεντρική Αφρική</i>	30,2	72,5	96,0	98,6	9,4%
<i>Ευρώπη και Ευρασία</i>	88,8	75,0	84,1	97,5	9,3%
<i>Μέση Ανατολή</i>	369,0	661,8	685,6	685,6	65,4%
<i>Αφρική</i>	57,8	61,9	77,4	77,4	7,4%
<i>Ανατολική Ασία</i>	39,2	44,6	43,8	38,7	3,7%
<i>Σύνολο</i>	676,7	1006,7	1047,7	142,7	100,0 %
<i>Εκ των οποίων</i>					
<i>ΟΠΕΚ</i>	443,3	769,9	819,0	111,9	78,2%
<i>ΟΟΣΑ</i>	116,7	108,9	72,0	9,4	6,9%
<i>Ενωμένη Σοβιετική Ένωση</i>	63,0	57,0	77,8	10,7	7,4%

Πίνακας 1-3: Βεβαιωμένα αποθέματα πετρελαίου ανά περιοχή<sup>[3]</sup>

## 1.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΡΓΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Σε παγκόσμια κλίμακα η Μέση Ανατολή (28,5%) είναι η κυρίαρχος παραγωγός περιοχή και ακολουθεί η Ευρώπη-Ευρασία (22%) και η Βόρεια Αμερική (18,7%). [3] Αντίθετα στην Ελλάδα η παραγωγή είναι περιορισμένη. Το κοιτάσμα του Πρίνου καλύπτει μόλις το 2% της εγχώριας ζήτησης, με αποτέλεσμα το σύνολο σχεδόν των αναγκών της χώρας σε αργό πετρέλαιο να καλύπτεται από εισαγωγές.

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 1-4) καταγράφεται η κατανάλωση πετρελαίου ανά περιοχή. Μεγαλύτερη κατανάλωση, εμφανίζει η Βόρεια Αμερική (30,2%) και ακολουθεί η Ανατολική Ασία (28,1%) και η Ευρώπη-Ευρασία (26,4%). Γίνεται φανερό πως η κατανάλωση πετρελαίου συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη της κάθε περιοχής, δηλαδή οι αναπτυγμένες περιοχές παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ζήτηση σε προϊόντα πετρελαίου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως η κατανομή της ζήτησης σε προϊόντα πετρελαίου παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή. Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. όπου χρησιμοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό βενζινοκίνητα οχήματα, η ζήτηση βενζίνης καλύπτει σημαντικότερο ποσοστό απ' ότι στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ιαπωνίας όπου χρησιμοποιούνται περισσότερο κινητήρες ντίζελ στις οδικές μεταφορές εμπορευμάτων.[2],[3]

<b>Κατανάλωση (σε εκατομμύρια τόνους)</b>							
	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2002 (Ποσοστό επί του συνόλου)
<b>Βόρεια Αμερική</b>	930,2	966,0	992,4	1031,7	1069,8	1064,9	30,2%
<b>Νότια και Κεντρική Αμερική</b>	175,7	186,4	201,8	219,6	218,3	214,8	6,1 %
<b>Ευρώπη και Ευρασία</b>	1062,5	946,9	930,2	942,3	927,1	925,2	26,3%
<b>Μέση Ανατολή</b>	173,7	187,1	198,3	202,0	208,3	207,4	5,9%
<b>Αφρική</b>	97,0	100,6	106,1	112,5	115,9	118,6	3,4%
<b>Ανατολική Ασία</b>	731,3	812,5	892,5	903,6	978,1	991,6	28,1%
<b>Σύνολο</b>	3170,4	3199,5	3321,3	3411,7	3517,5	3522,5	100,0%

Πίνακας 1-4: Κατανάλωση Πετρελαίου ανά περιοχή (σε εκατομμύρια τόνους)<sup>[3]</sup>



## 1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γεώργιος Β. Κυριακόπουλος, «Τεχνολογία Πετρέλαιο». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1977.
2. Στούρνας Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., «Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών», Εκδ. Ε.Μ.Π, Αθήνα 2002
3. "BP Statistical Review of World Energy". Ιούνιος 2003, ([www.bp.com](http://www.bp.com))
4. "Key World Energy Statistics from the IEA", 2002, ([www.iea.com](http://www.iea.com))
5. Εγκυκλοπαίδεια «Πάπυρος - Λαρούς - Μπριτάνικα»
6. [www.moh.gr](http://www.moh.gr)

## ***Κεφάλαιο 2***

### ***Αεροπορικά Καύσιμα***

#### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σήμερα, υπάρχουν δύο είδη κινητήρων που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη, ο εμβολοφόρος κινητήρας (piston engine) και ο κινητήρας που λειτουργεί με αεριοστρόβιλο (gas turbine). Οι δύο αυτοί τύποι κινητήρων είναι πολύ διαφορετικοί μεταξύ τους και ως εκ τούτου, τα αεροπορικά καύσιμα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις αεροπορικές βενζίνες (aviation gasoline-avgas) για τους εμβολοφόρους κινητήρες και τα καύσιμα για τους αεριοστρόβιλους (turbine/ jet fuels).

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι τα καύσιμα αεριοστροβίλων, τα οποία έχουν διαφορετικές προδιαγραφές ανάλογα με την τελική τους χρήση (πολιτική ή πολεμική αεροπορία), ενώ οι αεροπορικές βενζίνες έχουν πλέον περιορισμένη εφαρμογή.[1],[4]

#### **2.2 ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΕΣ ΒΕΝΖΙΝΕΣ**

Η αεροπορική βενζίνη είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται στους εμβολοφόρους κινητήρες ελικοφόρων αεροσκαφών. Όπως συμβαίνει με όλους τους τύπους βενζίνης, είναι πολύ πτητική και επομένως εξαιρετικά εύφλεκτη σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας, οπότε πρέπει πάντα να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να τηρούνται αυστηρά οι διαδικασίες αποθήκευσης και χρήσης του καυσίμου. [4]

##### **2.2.1 ΤΥΠΟΙ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΒΕΝΖΙΝΩΝ**

Οι τύποι των αεροπορικών βενζινών καθορίζονται κυρίως από την αντικροτική τους συμπεριφορά σε συνθήκες πτώχου και πλούσιου μίγματος. Για παράδειγμα στον

τύπο 100/130, ο πρώτος αριθμός καταδεικνύει τη συμπεριφορά του καυσίμου σε συνθήκες πτωχού μίγματος και ο δεύτερος σε συνθήκες πλούσιου μίγματος. Όταν ο αριθμός είναι μικρότερος ή ίσος του 100 αναφερόμαστε στην κλίμακα των οκτανίων , ενώ για αριθμούς μεγαλύτερους του 100 αναφερόμαστε στην κλίμακα των αριθμών συμπεριφοράς. Σήμερα πάντως, για την αποφυγή λαθών στη χρήση της βενζίνης, κάθε τύπος αναφέρεται μονό με τη συμπεριφορά του σε συνθήκες πτωχού μίγματος. Για παράδειγμα, ο τύπος 100/130 αναφέρεται απλώς ως 100.

Ο εξοπλισμός και οι εγκαταστάσεις διαχείρισης και αποθήκευσης των αεροπορικών βενζινών είναι κωδικοποιημένοι με χρώματα και φέρουν ευκρινώς τα σήματα API που καταδεικνύουν τον τύπο βενζίνης για τον οποίο προορίζονται. Επιπλέον, τα ίδια τα καύσιμα είναι χρωματισμένα, ώστε να είναι εύκολη η ταυτοποίησή τους. Σήμερα ο κυριότερος τύπος αεροπορικής βενζίνης που χρησιμοποιείται, είναι η 100LL , που έχει μπλε χρώμα, ( η 100 και η 80 που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα έχουν σήμερα πρακτικά καταργηθεί). Σημειώνεται πως γίνονται προσπάθειες να αντικατασταθεί και η 100LL με μια αμόλυβδη αεροπορική βενζίνη.

Χρωματισμένα είναι και τα ακροφύσια του συστήματος ανεφοδιασμού των αεροσκαφών με αεροπορική βενζίνη, με κόκκινο χρώμα. Τέλος, για την αποφυγή τροφοδοσίας καυσίμου αεροστροβίλων σε αεροσκάφος με εμβολοφόρο κινητήρα, τα ακροφύσια του συστήματος ανεφοδιασμού με αεροπορική βενζίνη έχουν μέγιστη διάμετρο 40 mm (49 mm στις ΗΠΑ) με τη δεξαμενή καύσιμου να έχει μέγιστο άνοιγμα 60 mm, ενώ τα ακροφύσια του συστήματος ανεφοδιασμού με καύσιμα αεροστροβίλων έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 60mm.

## 2.3 ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

### 2.3.1 ΤΥΠΟΙ - ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.

Η κηροζίνη (το πρώτο χρήσιμο προϊόν που παρήχθη από την απόσταξη του αργού πετρελαίου) που χρησιμοποιούταν σαν καύσιμο σε λάμπες φωτισμού, ήταν το πρώτο καύσιμο με το οποίο τροφοδοτούνταν οι αεριοστροβίλοι. Η επιλογή της κηροζίνης οφειλόταν κυρίως στη διαθεσιμότητα της αφού κατά τη διάρκεια του πολέμου η βενζίνη ήταν υπό έλλειψη. Πιθανόν βέβαια και λόγοι όπως το υψηλό ενεργειακό της περιεχόμενο καθώς και η χαμηλότερη εκρηκτικότητα της σε σχέση με τη βενζίνη να ελήφθησαν υπόψη γι' αυτή την επιλογή. [1] , [4].

Μετά από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α., άρχισε να χρησιμοποιεί καύσιμο "wide-cut", το οποίο ουσιαστικά είναι μίγμα κλασμάτων υδρογονανθράκων κηροζίνης και βενζίνης. Πάλι οι συνθήκες διαθεσιμότητας των προϊόντων του πετρελαίου είναι αυτές που οδήγησαν στη συγκεκριμένη επιλογή. Θεωρούνταν πως το καύσιμο "wide-cut" θα ήταν διαθέσιμα σε μεγαλύτερες ποσότητες απ' ότι μόνο η κηροζίνη ή η βενζίνη, ιδιαίτερα σε συνθήκες πολέμου.[41

Εντούτοις , έναντι των καυσίμων τύπου κηροζίνης, τα καύσιμα "wide-cut" για αεριοστροβίλους είχαν μειονεκτήματα που κυρίως οφείλονταν στην υψηλότερη πτητικότητα τους:

- μεγαλύτερες απώλειες καυσίμου λόγοι εξάτμισης σε μεγάλα ύψη
- μεγαλύτερος κίνδυνος πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια κύησης των αεροσκαφών στο έδαφος
- τα ατυχήματα με αεροσκάφη που τροφοδοτήθηκαν με καύσιμα "wide-cut" είχαν πιο συχνά θανατηφόρα κατάληξη.

Έτσι από τη δεκαετία του '70 τα καύσιμα τύπου κηροζίνης κυριάρχησαν στους αεριοστροβίλους. [4]

Παραθέτοντας αναλυτικότερα αυτή την εξέλιξη στα καύσιμα των αεριοστροβίλων έχουμε τα παρακάτω:

**JP-1 (1944):** Επρόκειτο για κηροζίνη με σημείο πήξης - 60,5°C, σημείο ανάφλεξης 43°C και τελικό σημείο απόσταξης (endpoint) κατά ASTM τους 300°C. Χαρακτηριστικά της ήταν η χαμηλή τάση ατμών, οι καλές λιπαντικές ιδιότητες και το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο (θερμότητα καύσης) ανά μονάδα όγκου. Θεωρούνταν ασφαλέστερο καύσιμο από τη βενζίνη εξαιτίας του υψηλότερου σημείου ανάφλεξης.

Τα καύσιμα τύπου κηροζίνης όπως το JP-1, έχουν όμως και τα εξής μειονεκτήματα: Η κηροζίνη έχει την τάση να διατηρεί νερό και στερεά σε κολλοειδή κατάσταση - suspension - , δημιουργώντας έτσι πρόβλημα στο φιλτράρισμα, καθώς επίσης οδηγεί και σε σχηματισμό πάγου. Επίσης παρουσιάζονταν προβλήματα σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε μεγάλα ύψη.

Θα έπρεπε επίσης να σημειωθεί πως η προδιαγραφή για το σημείο πήξης περιόριζε τη διαθεσιμότητα του JP-1, αφού τα διυλιστήρια που μπορούσαν να ανταποκριθούν σε μια τέτοια απαίτηση ήταν πολύ λίγα. ( Επιπλέον η διαθεσιμότητα της κηροζίνης είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή της βενζίνης αφού παράγεται περισσότερο βενζίνη παρά κηροζίνη από ένα βαρέλι αργού πετρελαίου.)

**JP-2 (1945):** Αυτό το καύσιμο ήταν ένα πειραματικό μίγμα βενζίνης και κηροζίνης (καύσιμο "wide-cut"). Το μεγαλύτερο ποσοστό του μίγματος ήταν κηροζίνη και δεν υπήρχε αρκετό αργό πετρέλαιο για να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ποσότητα της. Απορρίφθηκε λόγω μη ικανοποιητικών ιδιοτήτων που αφορούσαν το ιξώδες και τα χαρακτηριστικά καύσης αυτού.

**JP-3 (1947):** Το καύσιμο αυτό εκτόπισε το JP-1 και ήταν ένα μίγμα με 65-70% βενζίνη και 30-35% κηροζίνη. Είχε τάση ατμών 35,5-48,3 kPa (5-7 psi), σημείο ανάφλεξης - 40°C και τελικό σημείο απόσταξης 287.8°C. Το JP-3 είχε λοιπόν υψηλή τάση ατμών, συγκρίσιμη με αυτή των αεροπορικών βενζινών. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα αεροσκάφη με αεριοστροβίλους πετούν σε μεγαλύτερα ύψη απ' ότι τα αεροσκάφη με εμβολοφόρους κινητήρες, -όπως έχει προαναφερθεί- οδηγούσε σε απώλειες καυσίμου λόγω εξάτμισης και προκαλούσε σοβαρά προβλήματα κατά τις πτήσεις σε μεγάλα ύψη και τις απότομες μεταβολές του ύψους πτήσης. Επίσης είχε μειωμένες λιπαντικές ικανότητες εξαιτίας της μεγάλης περιεκτικότητας του σε βενζίνη.

**JP-4 (1951):** Ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα καύσιμα της πολεμικής αεροπορίας ήταν το JP-4. Αναφέρεται και ως Jet-B ή με τον κωδικό F-40 του NATO, εισήχθη το 1951 και είναι ένα μίγμα κηροζίνης-βενζίνης, με μέγιστη τάση ατμών της τάξης των 13,8-20,7 kPa (2-3psi), ώστε να μειωθούν τα προβλήματα εξάτμισης και ατμόφραξης στο καύσιμο ( μειώνονται επίσης και οι απώλειες του καυσίμου από τις δεξαμενές). Έχει σημείο πήξης -60,5°C. Αποστάζει σε θερμοκρασιακό εύρος 176,7-

287,8<sup>0</sup>C (350-550<sup>0</sup>F). Η απουσία των ελαφρύτερων κλασμάτων ( lighter ends ) μειώνει όχι μόνο την τάση ατμών αλλά και την απόδοση καύσης σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλα ύψη. Περιέχει πρόσθετα για την αποτροπή εμφάνισης πάγου και αντιδιαβητικά. Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 ενσωματώθηκε στο καύσιμο ένα αντιστατικό πρόσθετο για λόγους ασφαλείας. Το JP-4 ήταν το κύριο καύσιμο της πολεμικής αεροπορίας των χωρών του NATO για πολλά χρόνια, αλλά εγκαταλείφθηκε πρόσφατα εξαιτίας της υψηλής πτητικότητας τούτο 1987 η Πολεμική αεροπορία των Η.Π.Α. ξεκίνησε να το αντικαθιστά με το ασφαλέστερο JP-8-.

**JP-5 (1952):** Το JP-5, που αναφέρεται και με τον κωδικό F-44 του NATO, εισήχθη το 1952 και σχεδιάστηκε για τα μεταγωγικά της αεροπορίας του πολεμικού ναυτικού των Η.Π.Α παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα σε σχέση με το JP-4 και δεν έχει αντιστατικά πρόσθετα. Περιέχει όμως πρόσθετα για την αποτροπή εμφάνισης πάγου και αντιδιαβρωτικά. Για λόγους ασφαλείας έχει ελάχιστο σημείο ανάφλεξης 60°C, ενώ το σημείο πήξης του καυσίμου είναι -46°C. Εξαιτίας της μικρής του πτητικότητας αποθηκεύεται με ασφάλεια. Αξίζει να σημειωθεί πως παλαιότερα, επειδή στα αεροπλανοφόρα χρειαζόταν και αεροπορική βενζίνη και καύσιμο για αεριοστρόβιλους και οι αποθηκευτικοί χώροι ήταν περιορισμένοι, υπήρχε η πρακτική της ανάμιξης του JP-5 με αεροπορική βενζίνη με σκοπό την παραγωγή ενός καυσίμου παρόμοιου με το JP-4. Σήμερα όμως, αυτή η πρακτική έχει εγκαταλειφθεί. Καθορίζεται από τη στρατιωτική προδιαγραφή MIL- PRF -5624S των Η.Π.Α. και τη Βρετανική DEF STAN 91-86 AVCAT/FSII.

**JP-6 (1956):** Το JP-6 αναπτύχθηκε το 1956 για υπερηχητικά αεροσκάφη τύπου XB-70. Το καύσιμο αυτό είναι παρόμοιο με το JP-5, αλλά με χαμηλότερο σημείο ροής (-54 °C) και αυξημένη θερμική σταθερότητα. Το χαμηλό σημείο πήξης το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε ψυχρά κλίματα και μεγάλα ύψη. Για το JP-6 δεν υπάρχει προδιαγραφή που να αφορά το σημείο ανάφλεξης. Το JP-6, όπως και το JP-5, βρίσκονται σε μικρότερη διαθεσιμότητα από το JP-4.

**JPTS-Jet Propellant Thermally Stable (1956):** Αναπτύχθηκε για τα αεροσκάφη τύπου U-2 και πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1956. Είναι κηροζίνη υψηλής κατεργασίας, ενισχυμένη με πρόσθετα για βελτίωση της θερμικής σταθερότητας και έχει σημείο ροής -54°C και ελάχιστο σημείο ανάφλεξης 43°C.

**JP – 7 (1960):** Το JP – 7 αναπτύχθηκε το 1960 για τα αεροσκάφη τύπου SR-71 (Lockheed). Έχει χαμηλή τάση ατμών και πολύ μεγάλη θερμική σταθερότητα σε μεγάλα υψόμετρα και ταχύτητες μεγαλύτερες από Mach 3. Έχει σημείο ροής  $-44^{\circ}\text{C}$  και σημείο ανάφλεξης  $60^{\circ}\text{C}$ .

**JP-8 (1979):** Το JP-8 πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1979 και αναφέρεται με τον κωδικό F-34 του NATO. Το καύσιμο αυτό είναι παρόμοιο με το Jet A-1 που χρησιμοποιείται στην πολιτική αεροπορία, αλλά είναι ενισχυμένο με αντιπαγωτικά και αντιστατικά πρόσθετα και βελτιωτικά της λιπαντικής του ικανότητας. Το JP-8 είναι πιο ασφαλές από το JP-4 αφού έχει υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, χαμηλότερη τάση ατμών και πιο αργή διάδοση φλόγας. Συγκεκριμένα το JP-8 έχει ελάχιστο σημείο ανάφλεξης στους  $37,8^{\circ}\text{C}$  ( $100^{\circ}\text{F}$ ). Καθορίζεται από τη στρατιωτική προδιαγραφή MIL-T-83133D των Η.Π.Α., τη Βρετανική DEF STAN 91-87 AVTUR/FSII και σύμφωνα με τον Καναδικό Οργανισμό Προτύπων CAN/CGSB-3.23. Σημειώνεται πως σήμερα χρησιμοποιείται και ένας ειδικός τύπος του JP-8, το JP-8+100, το οποίο περιέχει πρόσθετα για τη βελτίωση της θερμικής σταθερότητας. [4],[5],[6],[7],[8],[9],[14],[15].

Τα παραπάνω καύσιμα χρησιμοποιούνται, στην πολεμική αεροπορία. Σε ότι αφορά την πολιτική αεροπορία έχουμε τους εξής τύπους:

**Jet-A:** Το Jet-A προέρχεται από ένα σχετικά μικρό μέρος του κλάσματος της κηροζίνης και χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας. Συνήθως δεν περιέχει πρόσθετα, αν και υπάρχει περίπτωση να χρησιμοποιηθεί με πρόσθετα για την αποτροπή εμφάνισης πάγου. Έχει σημείο πήξης περίπου  $-40^{\circ}\text{C}$ . Καθορίζεται, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-1655.

**Jet-A1:** Αναφέρεται με τον κωδικό F-35 του NATO. Το Jet-A1 είναι όμοιο με το Jet-A με μόνη διαφορά το σημείο πήξης. Χρησιμοποιείται και εκτός των Η.Π.Α. -σε αντίθεση με το Jet-A1 - ειδικά για πολύωρες διαδρομές όπου η θερμοκρασία μπορεί να πλησιάσει το σημείο πήξης. Συνήθως περιέχει πρόσθετο για την αποτροπή εμφάνισης στατικού ηλεκτρισμού. Το σημείο ανάφλεξης καθορίζεται (σύμφωνα με διεθνείς περιορισμούς) καθορίζεται πάνω από τους  $38^{\circ}\text{C}$ . ενώ το σημείο πήξης πρέπει

να εμφανίσει μέγιστο στους  $-47^{\circ}\text{C}$ . Καθορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-1655.

**Jet-B:** Το Jet-B προέρχεται από την ανάμιξη ενός ευρύτερου μέρους του κλάσματος της κηροζίνης με ελαφρύτερα στοιχεία (μίγμα κηροζίνης και βενζίνης). Χρησιμοποιείται κυρίως στον Καναδά και γενικότερα σε περιοχές με έντονο ψύχος. Περιέχει πρόσθετα για την αποτροπή εμφάνισης στατικού ηλεκτρισμού και έχει πολύ χαμηλό σημείο ανάφλεξης (γεγονός που δημιουργεί αυξημένο κίνδυνο ανάφλεξης και πρόσθετα μέτρα ασφαλείας). Σημειώνεται πως σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς. Καθορίζεται σύμφωνα με το Καναδικό Οργανισμό Προτύπων(CAN/CGSB 3.23). [5],[10],[9],[ 13] .



Πίνακας 2-1: Προδιαγραφές καυσίμων αεροστροβίλων πολεμικής αεροπορίας

(πηγή ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε - ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ )

<b>Καύσιμα Αεροστροβίλων Πολεμικής Αεροπορίας</b>			
<b>Τύπος:</b>	<b>JP 8</b>	<b>JP4</b>	<b>Μέθοδοι Ελέγχου</b>
<b>Είδος καυσίμου</b>	<b>Κηροζίνη</b>	<b>Wide-Cut</b>	<b>ASTM</b>
<b>Σ Υ Σ Τ Α Σ Η</b>			
Θείο , Μερκαπτανών (% κ.β), μεγ.	0,001	0,003	D-3227
Ολικό Θείο (% κ.β), μεγ.	0,4	0,4	D-5453
Αρωματικά (% κ.β), μεγ.	25	25	D-1319
<b>ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ</b>			
Απόσταξη			D-86
Αρχικό σημείο, °C	Αναφορά	Αναφορά	
10% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	205	Αναφορά	
20% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	Αναφορά	145	
50% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	Αναφορά	190	
90% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	Αναφορά	245	
Τελικό σημείο, °C, μεγ.	300	270	
Υπόλειμμα, % κ.ο, μεγ.	1,5	1,5	
Απώλειες, % κ.ο, μεγ.	1,5	1,5	
Σημείο ανάφλεξης, °C, ελαχ.	38		D-56
Πυκνότητα στους 15°C, Kg/m <sup>3</sup>	775-840	751-802	D-1298
<b>Ρ Ε Υ Σ Τ Ο Τ Η Τ Α</b>			
Σημείο πήξης, °C, μεγ.	-47	-58	D-2386
Ιξώδες στους -20°C, cSt., μεγ.	8		D-445
<b>Κ Α Υ Σ Η</b>			
Κατωτ.θερμογ.δύναμη, MJ/Kg, ελαχ.	42.8	42.8	D-240
<b>Δ Ι Α Β Ρ Ω Σ Η / Σ Τ Α Θ Ε Ρ Ο Τ Η Τ Α</b>			
Διάβρωση χαλκού (2h,100°C), No, μεγ.	1	1	D-130
Θερμική σταθερότητα (JFTOT)			
Πτώση πίεσης, mmHg, μεγ.	25	25	
Οπτική εκτίμηση σωλήνα, No, μεγ.	<3	<3	
<b>Π Ρ Ο Σ Μ Ι Ξ Ε Ι Σ</b>			
Υπάρχοντα κομιώδη, mg/100ml, μεγ.	7	7	D-381
Αντίδραση νερού εκτίμηση μεσεπιφάνειας, No, μεγ.	1β	1β	D-1094
Δείκτης διαχωρισμού νερού Τροποποιημένος, ελαχ.	70	70	D-2550
Χρόνος Διήθησης, ελαχ.		15	
<b>ΠΡΟΣΘΕΤΑ</b>			
Αντιοξειδωτικό, mg/l	Απαιτείται	Απαιτείται	
Απενεργοποιητής μετάλλων, mg/l, μεγ	Προαιρετικά	Προαιρετικά	
Αντιστατικό	Απαιτείται	Απαιτείται	

<b>Καύσιμα Αεροστροβίλων Πολιτικής Αεροπορίας</b>			
<b>Τύπος:</b>	<b>Jet A 1/ Jet A</b>	<b>Jet B</b>	<b>Μέθοδοι Ελέγχου</b>
<b>Είδος καυσίμου</b>	<b>Κηροζίνη</b>	<b>Wide-Cut</b>	<b>ASTM</b>
<b>Σ Υ Σ Τ Α Σ Η</b>			
Θείο , Μερκαπτανών (% κ.β), μεγ.	0,003	0,003	D-3227
Ολικό Θείο (% κ.β), μεγ.	0,3	0,3	D-5453
Αρωματικά (% κ.β), μεγ.	25	25	D-1319
<b>ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ</b>			
Απόσταξη			D-86
Αρχικό σημείο, °C	205		
10% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	205		
20% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.		145	
50% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	Αναφορά	190	
90% v/v συμπύκνωμα, °C, μεγ.	Αναφορά	245	
Τελικό σημείο, °C, μεγ.	300		
Υπόλειμμα, % κ.ο, μεγ.	1,5	1,5	
Απώλειες, % κ.ο, μεγ.	1,5	1,5	
Σημείο ανάφλεξης, °C, ελαχ.	38	751-802	D-56
Πυκνότητα στους 15°C, Kg/m <sup>3</sup>	775-840	21	D-1298/D-4052
<b>Ρ Ε Υ Σ Τ Ο Τ Η Τ Α</b>			
Σημείο ψύξης, °C, μεγ.	-40(Jet A) / -47 (Jet A1)	-50	D-2386
Ιξώδες στους -20°C, cSt, μεγ.	8.0		D-445
<b>Κ Α Υ Σ Η</b>			
Κατωτ.θερμογ.δύναμη, MJ/Kg, ελαχ.	42.8	42.8	D-4529
<b>Δ Ι Α Β Ρ Ω Σ Η / Σ Τ Α Θ Ε Ρ Ο Τ Η Τ Α</b>			
Διάβρωση χαλκού (2h,100°C), No, μεγ.	1	1	D-130
Θερμική σταθερότητα (JFTOT)	25	25	
Πτώση πίεσης, mmHg, μεγ.	<3	<3	
Οπτική εκτίμηση σωλήνα, No, μεγ.			
<b>Π Ρ Ο Σ Μ Ι Ξ Ε Ι Σ</b>			
Υπάρχοντα κομμάδια, mg/100ml, μεγ.	7	7	D-381
Αντίδραση νερού	1β	1β	D-1094
εκτίμηση μεσεπιφάνειας, No, μεγ.			D-2550
Δείκτης διαχωρισμού νερού			
Τροποποιημένος, ελαχ.	70	70	
Χρόνος Διήθησης, ελαχ.		15	
<b>ΠΡΟΣΘΕΤΑ</b>			
Αντιοξειδωτικό, mg/l	24	24	
Απενεργοποιητής μετάλλων, mg/l, μεγ	5,7	5,7	
Αντιστατικό	Απαιτείται	Απαιτείται	

Πίνακας 2-2: Προδιαγραφές καυσίμων αεροστροβίλων πολιτικής αεροπορίας.

(πηγή ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε - ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟ ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ)

Υπάρχουν και κάποιοι ακόμα τύποι καυσίμων λιγότερο διαδεδομένοι, η μελέτη των οποίων όμως ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Οι τύποι αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως στις χώρες της Ασίας.

### 2.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Τα καύσιμα αεροστροβίλων πρέπει να ικανοποιούν μια σειρά από διαφορετικές απαιτήσεις, που είναι αρκετά πιο αυστηρές απ'ότι για παράδειγμα σε επίγειους αεροστρόβιλους. Οι απαιτήσεις αυτές οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι οι κινητήρες αεροσκαφών λειτουργούν σε ιδιαίτερες συνθήκες περιβάλλοντος. Για παράδειγμα σε μεγάλα ύψη πτήσης έχουμε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (σε ύψος 10.000 m επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των - 50°C) ενώ στο έδαφος σε θερμά κλίματα ή σε υπερηχητικές πτήσεις μπορεί να έχουμε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Κατ' αρχάς παρατίθενται κάποιες γενικές απαιτήσεις:

- Πυρασφάλεια - μείωση κινδύνων πυρκαγιάς- : το καύσιμο θα πρέπει να έχει χαμηλή τάση ατμών, χαμηλή πτητικότητα, υψηλό σημείο ανάφλεξης και υψηλή αγωγιμότητα για να ελαχιστοποιείται η ανάπτυξη στατικού ηλεκτρισμού κατά την τροφοδοσία.
- Υψηλή θερμογόνο δύναμη, για ελαχιστοποίηση της ποσότητας που απαιτείται για συγκεκριμένη εμβέλεια.
- Χαμηλή τάση ατμών, για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από ατμοποίηση σε μικρές πιέσεις ( μεγάλα ύψη πτήσης ).

Επιπλέον για την εξασφάλιση ικανοποιητικής διαχείρισης από το σύστημα καυσίμου, για την τροφοδοσία των θαλάμων καύσης έχουμε τις εξής απαιτήσεις:

- χαμηλό ιξώδες, για να είναι εύκολη η άντληση και ο διασκορπισμός.
- υψηλή λιπαντική ικανότητα για ελαχιστοποίηση φθορών της αντλίας καυσίμου.
- απουσία εμφράξεων είτε από κρυστάλλους στερεοποιημένου καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες είτε από κρυστάλλους κεριού που σχηματίζεται μέσα στο καύσιμο ( για αποφυγή τέτοιων προβλημάτων χρησιμοποιούνται πρόσθετα στο καύσιμο).

Τέλος, για την καλή λειτουργία του θαλάμου καύσης το καύσιμο πρέπει:

- να έχει καλό διασκορπισμό

- να μην περιέχει ουσίες που μπορεί να προκαλούν εμφράξεις σε σωληνίσκους ή ακροφύσια καυσίμου ( π.χ. μέταλλα όπως Νάτριο, Κάλιο, Βανάδιο, Ασβέστιο και Μόλυβδος με τη μορφή ενώσεων τους είναι δυνατό να σχηματίσουν επικαθίσεις και κατάλοιπα)

- να υφίσταται γρήγορη αεριοποίηση.

- να είναι ελαχιστοποιημένος ο σχηματισμός εξανθρακωμάτων. [3]

Στις επόμενες παραγράφους εξετάζονται οι ιδιότητες που θα πρέπει να έχει ένα καύσιμο που προορίζεται για χρήση σε αεριοστροβίλο, καθώς και η επίδραση που έχουν αυτές οι ιδιότητες στον καθορισμό των προδιαγραφών του καυσίμου. Οι κυριότερες είναι η σταθερότητα, το ενεργειακό περιεχόμενο και οι ιδιότητες καύσης.

### 2.3.2.1 ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Σταθερά είναι τα καύσιμα των οποίων οι ιδιότητες παραμένουν αμετάβλητες. Παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε δυσμενείς (επιβλαβείς) μεταβολές των ιδιοτήτων των καυσίμων είναι ο χρόνος (σταθερότητα αποθήκευσης storage stability) και οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στον κινητήρα (θερμική σταθερότητα - thermal stability).

Για καύσιμα αεροστροβίλων οδηγούνται σε αστάθεια μέσω χημικών αντιδράσεων πολλαπλών βημάτων (multi steps), όπως αντιδράσεις οξειδωσης . Τα υπεροξειδία και τα υδροϋπεροξειδία είναι τα αρχικά προϊόντα των αντιδράσεων. Τα προϊόντα παραμένουν διαλυμένα στο καύσιμο και συνήθως προσβάλλουν τα ελαστικά μέρη του συστήματος καύσης των κινητήρων. Άλλες αντιδράσεις οδηγούν σε σχηματισμό κόμμεων και αδιάλυτων ουσιών. Τα προϊόντα αυτά φράζουν τα φίλτρα καυσίμου και επικάθονται στις επιφάνειες των σωληνώσεων, και όταν αυτές είναι μικρής διαμέτρου δημιουργείται πρόβλημα στη ροή του καυσίμου.

#### • Σταθερότητα αποθήκευσης

Η αστάθεια των καυσίμων αεροστροβίλων κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, δεν είναι γενικά ιδιαίτερο πρόβλημα επειδή τα περισσότερα καύσιμα χρησιμοποιούνται, εντός μερικών εβδομάδων ή έστω εντός μερικών μηνών από τη στιγμή παρασκευής τους. Η σταθερότητα του καυσίμου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης είναι ζήτημα που συνήθως απασχολεί τον στρατό, ο οποίος αποθηκεύει τέτοια καύσιμα για χρήση έκτακτης ανάγκης. Επίσης το ζήτημα αυτό απασχολεί και μικρούς αερολιμένες στους οποίους η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρή.

Τα καύσιμα αεριοστροβίλων θα πρέπει, εφόσον παρασκευάζονται και αποθηκεύονται με κατάλληλο τρόπο, να διατηρούνται σταθερά (αμετάβλητες ιδιότητες) για περισσότερο από ένα έτος. Θα πρέπει να σημειωθεί πως καύσιμα, για τα οποία οι συνθήκες διαχείρισης και αποθήκευσης δεν είναι κατάλληλες (ιδανικές). Θα πρέπει να ελέγχονται πριν τη χρήση.

Η σταθερότητα των καυσίμων επηρεάζεται εκτός από το χρόνο αποθήκευσης, και από τη σύσταση του καυσίμου όπως και από συνθήκες αποθήκευσης.

Αντιοξειδωτικά πρόσθετα χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της σταθερότητας αποθήκευσης. [4],[6],[7].

#### • Θερμική Σταθερότητα

Η θερμική σταθερότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των καυσίμων αεριοστροβίλων, επειδή τα τελευταία αποτελούν ένα μέσο ανταλλαγής θερμότητας μεταξύ κινητήρα και του πλαισίου του αεροσκάφους.

Όπως έχει σημειωθεί και προηγουμένως αν τα καύσιμα αεριοστροβίλων θερμανθούν (θερμική οξείδωση) θα έχουμε σχηματισμό κόμμεων και σωματιδίων (διαλυτών ή αδιάλυτων). Αυτά επικάθονται:

- Στα φίλτρα καυσίμου, αυξάνοντας την πτώση πίεσης στο φίλτρο και μειώνοντας τη ροή του καυσίμου.
- Στα ακροφύσια εγχυτήρων καυσίμου, δημιουργώντας προβλήματα κατά το ψεκασμό και οδηγώντας πολλές φορές στο σχηματισμό καυτών σημείων (hot spots) στο θάλαμο καύσης.
- Στους εναλλάκτες θερμότητας, μειώνοντας έτσι την απόδοση στη μεταφορά θερμότητας και στη ροή καυσίμου.

Οι επικαθίσεις αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε λειτουργικά προβλήματα και σε ανάγκες μεγαλύτερης συντήρησης.

Η σταθερότητα σε θερμική οξείδωση σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες επηρεάζεται από την ύπαρξη ακαθαρσιών στο καύσιμο, ενώ σε, υψηλότερες θερμοκρασίες από το είδος των υδρογονανθράκων του καυσίμου. Ακόμα η σταθερότητα σε οξείδωση των καυσίμων αεριοστροβίλων επηρεάζεται αρνητικά από τον αέρα που είναι διαλυμένος στο καύσιμο. Επίσης, μέταλλα που βρίσκονται στο καύσιμο με τη μορφή όξινων αλάτων ή συμπλοκών μειώνουν τη θερμική σταθερότητα των αεροπορικών καυσίμων.

Η παλαιότερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της σταθερότητας σε θερμική οξείδωση είναι η ASTM DM660. Η πιο πρόσφατη μέθοδος είναι η ASTM D-3241 (Jet Fuel Thermal Oxidation Tester. JFTOT). Σημειώνεται πως τα

αντιοξειδωτικά που χρησιμοποιούνται για τη σταθερότητα αποθήκευσης δε βελτιώνουν τη θερμική σταθερότητα.[1],[4]

### **2.3.2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ**

Οι κινητήρες αεριοστροβίλων, όπως και κάθε κινητήρας, μετατρέπει την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο σε μηχανική και θερμότητα. Δεδομένου ότι ο όγκος των χώρων αποθήκευσης στα αεροσκάφη είναι σημαντικό να είναι περιορισμένος, γίνεται εύκολα κατανοητό πως το ποσό ενέργειας που περιλαμβάνεται σε συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου έχει ιδιαίτερη σπουδαιότητα.

Το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσίμων μπορεί να μετρηθεί: είναι η θερμότητα που ελευθερώνεται (θερμότητα καύσης) από γνωστή ποσότητα καυσίμου και υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Για τα καύσιμα η πρότυπη θερμότητα καύσης ονομάζεται θερμογόνος (θερμαντική) δύναμη του καυσίμου. Για να προσδιοριστεί η θερμογόνος δύναμη, ένα δείγμα ορισμένης μάζας καίγεται με οξυγόνο σε μια θερμοδομετρική οβίδα και η ενέργεια που εκλύεται και προσδιορίζεται από τη μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας της οβίδας και της συσκευής που την περιβάλλει.

Επειδή το νερό που παράγεται στο θερμοδόμετρο είναι κοντά στη θερμοκρασία δωματίου (αν και το αέριο μέσα στην οβίδα είναι κορεσμένο με υδρατμούς σ' αυτή τη θερμοκρασία), ουσιαστικά όλο το νερό που σχηματίζεται κατά την καύση υγροποιείται. Αυτό διαφοροποιεί το θερμοδόμετρο από μια πραγματική διεργασία καύσης. Έτσι διακρίνονται δύο θερμογόνες δυνάμεις: η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (Α.Θ.Δ) όπου όλο το παραγόμενο νερό συμπυκνώνεται στην υγρή κατάσταση, και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (Κ.Θ.Δ.), όπου όλο το παραγόμενο νερό παραμένει στην αέρια κατάσταση.

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη προσδιορίζεται με τη μέθοδο AS 'TM D-240 με θερμοδόμετρο. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη προσδιορίζεται όταν είναι γνωστή η περιεκτικότητα του καυσίμου σε νερό με τη μέθοδο ASTM D-2382. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη μπορεί να προσδιοριστεί και με εμπειρικές σχέσεις με τις μεθόδους ASTM D-1405 και D-3338. [4],[12],[1]

### 2.3.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΗΣ

Η κύρια διαφορά μεταξύ των εμβολοφόρων κινητήρων (κινητήρων Diesel και Otto) και των αεριοστροβίλων είναι ότι η καύση στους τελευταίους είναι συνεχής σε αντίθεση με τους εμβολοφόρους όπου είναι, διαλείπουσα (ασυνεχής). Κατά συνέπεια οι απαιτήσεις για την ποιότητα της καύσης στους κινητήρες αυτούς είναι διαφορετικές.

Σε κινητήρες αεριοστροβίλων τα σωματίδια του άνθρακα διαμορφώνονται νωρίς κατά τη διαδικασία καύσης. Τα σωματίδια αυτά συνεχίζουν να καίγονται καθώς περνούν μέσω της φλόγας και υπό κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες καταναλώνονται εντελώς. Τα σωματίδια αυτά πυρακτώνονται στο θάλαμο καύσης υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Έχουμε έτσι εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης (μεταφορά θερμότητας δι' ακτινοβολίας). Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας δημιουργεί ρωγμές στα τοιχώματα και οδηγεί σε αστοχία των υλικών.

Αν αυτά τα ανθρακούχα σωματίδια δεν καταναλωθούν τελείως από τη φλόγα καθίστανται, επίσης, επιβλαβή εφόσον έρθουν σε επαφή με το κέλυφος του στροβίλου ή τις λεπίδες προκαλώντας διάβρωση.

### 2.3.2.4 ΛΙΠΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Λιπαντική ικανότητα ονομάζεται η ικανότητα μιας ουσίας να μειώνει την τριβή μεταξύ δύο μεταλλικών (στερεών) επιφανειών οι οποίες βρίσκονται σε σχετική κίνηση. Η λιπαντική ικανότητα είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας ενός υλικού ως λιπαντικό.

Τα καύσιμα αεριοστροβίλων πρέπει να έχουν καλή λιπαντική ικανότητα αφού τα ίδια αυτά λιπαίνουν τα κινούμενα μέρη στις αντλίες καυσίμου και στις μονάδες ελέγχου ροής.

Ο μηχανισμός λίπανσης είναι ένας συνδυασμός υδροδυναμικής λίπανσης (hydrodynamic lubrication) και οριακής λίπανσης (boundary lubrication). Στην υδροδυναμική λίπανση, ένα στρώμα του λιπαντικού ρευστού, αποτρέπει την επαφή (άρα και τριβή) μεταξύ δύο μεταλλικών επιφανειών. Τα ρευστά με υψηλότερο ιξώδες παρέχουν καλύτερη υδροδυναμική λίπανση.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι κινητήρες των αεριοστροβίλων, σήμερα, είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να λειτουργούν ικανοποιητικά με καύσιμα κανονικών τιμών ιξώδους και επομένως τα συνήθη καύσιμα αεριοστροβίλων παρέχουν επαρκή υδροδυναμική λίπανση.

Τέλος, τα καύσιμα τύπου "wide-cut" είναι καλά οριακά λιπαντικά. Αυτό οφείλεται σε ποσότητες (ίχνη) οξυγόνου-αζώτου- και θείου που περιέχονται στο καύσιμο.

### 2.3.2.5 ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η πτητικότητα, η τάση δηλαδή του καυσίμου να εξατμίζεται, είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των καυσίμων για αεροστροβίλους εξαιτίας της επίδρασης της σε πολλά θέματα λειτουργίας και ασφάλειας. Οι φασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν την πτητικότητα ενός καυσίμου είναι η τάση ατμών και η καμπύλη απόσταξης («προφίλ» απόσταξης). Τα πιο πτητικά καύσιμα έχουν μεγαλύτερη τάση ατμών και χαμηλότερες αρχικές θερμοκρασίες απόσταξης.

Το καύσιμο στις δεξαμενές των αεροσκαφών υφίσταται μεγάλες και απότομες αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση του. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορεί να χαθεί καύσιμο από τις δεξαμενές λόγω εξάτμισης (vaporization losses), η οποία σε μερικές περιπτώσεις μπορεί, να λάβει τη μορφή έντονου βρασμού με μικρούς όγκους υγρού να παρασύρονται από τους ατμούς. Η ποσότητα του καυσίμου που χάνεται εξαρτάται από την πτητικότητα του, από τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος και τη γεωμετρία της δεξαμενής.

Άλλο ένα πρόβλημα που μπορεί να συμβεί, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και / ή χαμηλής πίεσης είναι η ατμόφραξη (vapor locking). Για παράδειγμα, μια ποσότητα του καυσίμου μπορεί να εξατμιστεί στην είσοδο μιας αντλίας και να εμποδίσει έτσι τη μεταφορά υγρού καυσίμου πέρα από το σημείο αυτό. Επίσης, επειδή η πτητικότητα του καυσίμου έχει άμεση επίδραση στην ποσότητα των ατμών του καυσίμου που θα βρίσκονται σε ένα δεδομένο χώρο, από την ιδιότητα αυτή ανακύπτουν και θέματα ασφαλείας σχετικά με τον κίνδυνο για ανάφλεξη του καυσίμου σε συνθήκες αποθήκευσης.

Η πτητικότητα είναι μία από τις σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των καυσίμων τύπου κηροζίνης και τύπου "wide-cut". Τα καύσιμα αεροστροβίλων τύπου κηροζίνης είναι σχετικά μη πτητικά. Έχουν τάση ατμών κατά Reid περίπου 1 kPa. Τα καύσιμα τύπου "wide-cut" έχουν τάση ατμών κατά Reid περίπου 21 kPa. Τα καύσιμα αεροστροβίλων τύπου μικτής ανάμιξης (wide-cut) είναι καταλληλότερα για κρύες περιβαλλοντικές συνθήκες επειδή έχουν χαμηλότερο σημείο πήξης και ιξώδες από τα καύσιμα τύπου κηροζίνης.



### 2.3.2.6 ΡΕΥΣΤΟΤΗΤΑ

Είναι προφανές πως τα καύσιμα αεριοστροβίλων θα πρέπει να μπορούν να ρέουν μέσω σωληνώσεων στο σύστημα καύσης. Με τον όρο ρευστότητα προσεγγίζεται η ικανότητα μιας ουσίας να ρέει. Η ρευστότητα δεν είναι καθορισμένη φυσική ιδιότητα. Το ιξώδες και το σημείο πήξης είναι οι φυσικές ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ικανότητα ρευστότητας ενός καυσίμου.

Τα καύσιμα αεριοστροβίλων εκτίθενται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όταν τα αεροσκάφη βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο και, όταν διέρχονται από περιοχές όπου επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Γίνεται έτσι κατανοητό πως τα καύσιμα θα πρέπει, να διατηρούν τη ρευστότητα τους, για να μην έχουμε μείωση ή και διακοπή της ροής μέσα στο σύστημα καυσίμου.

- Σημείο Πήξης

Το σημείο πήξης (freezing point) είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, αναφορικά με τη ρευστότητα του καυσίμου σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Τα καύσιμα αεριοστροβίλων αποτελούν μίγματα μεγάλου αριθμού ενώσεων, που η καθεμιά έχει διαφορετικό σημείο πήξης. Ως εκ τούτου, το καύσιμο κατά την ψύξη του παγώνει σταδιακά. Ως σημείο πήξης, ορίζεται η θερμοκρασία στην οποία εξαφανίζονται οι τελευταίοι κρύσταλλοι καυσίμου όταν αυτό θερμαίνεται, αφού έχει ψυχθεί μέχρι να εμφανιστεί ικανοποιητικός αριθμός κρυστάλλου.

Το σημείο πήξης προσδιορίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D-2386. Οι προδιαγραφές θέτουν σαν όρια θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτών τις οποίες συναντούν τα αεροσκάφη, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη τροφοδοσία του κινητήρα με καύσιμο, ακόμη και κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες. [1],[4]

- Ιξώδες

Το ιξώδες ενός ρευστού αποτελεί ένα μέτρο της εσωτερικής του αντίστασης στη ροή. Το ιξώδες είναι πολύ σημαντικό για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης κατά το σχεδιασμό του συστήματος τροφοδοσίας του κινητήρα με το καύσιμο.

Το ιξώδες μεταβάλλεται σημαντικά με τη θερμοκρασία. Με μείωση της θερμοκρασίας αυξάνει το ιξώδες του καυσίμου. Οι προδιαγραφές θέτουν μέγιστα όρια ιξώδους των αεροπορικών καυσίμων σε χαμηλές θερμοκρασίες ώστε να

εξασφαλίσουν την αντλησιμότητα και τη ρευστότητα του καυσίμου στις χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στα ύψη στα οποία πετούν τα αεροσκάφη. Η μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία φαίνεται ανωτέρω σχήμα, πάνω στο ειδικό διάγραμμα της ASTM.[1],[4],[6]

### **2.3.2.7 ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑ**

Τα καύσιμα αεριοστροβίλου έρχονται σε επαφή με ποικίλα υλικά κατά τη διάρκεια της διανομής και της χρήσης τους. Είναι λοιπόν σημαντικό τα καύσιμα να μη διαβρώνουν τα υλικά αυτά. και ειδικότερα εκείνα που περιέχονται στο σύστημα καυσίμου στους κινητήρες αεριοστροβίλων.

Συγκεκριμένα οι δεξαμενές καυσίμου είναι κατασκευασμένες από άργιλο και επιπλέον μπορεί να περιέχουν κάποια επιστρώματα και στεγανοποιητικές ουσίες. Τα συστήματα καυσίμου αποτελούνται από χάλυβα και άλλα μέταλλα, όπως και από κάποια ελαστικά μέρη. Δίνεται έτσι λοιπόν ιδιαίτερη προσοχή ώστε να χρησιμοποιούνται στους κινητήρες υλικά που να είναι «συμβατά» με τα καύσιμα αεριοστροβίλων.

### **2.3.2.8 ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ**

Με τον όρο καθαρότητα ενός καυσίμου εννοούμε την απουσία απ'αυτό ελεύθερου ύδατος καθώς και στερεών σωματιδίων. Τα σωματίδια -ρύποι, σκουριά κ.λπ.- επικάθονται στα φίλτρα καυσίμου. Το νερό -εκτός του ότι δεν καίγεται- παγώνει σε χαμηλές θερμοκρασίες και είναι δυνατόν έτσι να δημιουργήσει προβλήματα στη ροή του καυσίμου. Επίσης το νερό επιδεινώνει το φαινόμενο της διάβρωσης των μετάλλων και επιπλέον οδηγεί σε ανάπτυξη μικροοργανισμών. Ακόμα πρέπει να σημειωθεί πως τα καύσιμα που παραδίδονται στα αεροσκάφη πρέπει να είναι απαλλαγμένα από μολυσματικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα μικρόβια, χρωστικές ουσίες και επιφανειοδραστικά.

- Μικροβιακή ανάπτυξη

Τα καύσιμα αεριοστροβίλων αρχικά είναι αποστειρωμένα αφού παράγονται υπό υψηλές θερμοκρασίες, μέσω των διυλιστηριακών διεργασιών. Μολύνονται όμως γρήγορα με μικροοργανισμούς που είναι πάντα παρόντες στο νερό και στον αέρα. Βακτήρια και μύκητες περιλαμβάνονται στους μικροοργανισμούς που περιέχονται στα καύσιμα.

Τα στερεά που σχηματίζονται μέσω μικροβιακής ανάπτυξης φράζουν τα φίλτρα καυσίμου. Επίσης μερικοί μικροοργανισμοί παράγουν όξινα παραπροϊόντα που επιταχύνουν τη διάβρωση των μετάλλων.

Δεδομένου ότι οι περισσότεροι μικροοργανισμοί χρειάζονται (απαιτούν) ελεύθερο νερό για την ανάπτυξη τους, συνεπάγεται ότι θα βρίσκονται συγκεντρωμένοι στη διεπιφάνεια μεταξύ νερού και καυσίμου. Οι μικροοργανισμοί αυτοί διακρίνονται σε αερόβιους και αναερόβιους, ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι την παρουσία αέρα για την ανάπτυξη τους.

Η μείωση της περιεκτικότητας κάποιων στοιχείων, όπως ο φώσφορος, μειώνει κατά πολύ τη μικροβιακή ανάπτυξη. Αντίθετα αύξηση της θερμοκρασίας συνεισφέρει θετικά στη μικροβιακή ανάπτυξη. Άλλοι παράγοντες που έχουν επίδραση στη μικροβιακή ανάπτυξη ελέγχονται με τη μέθοδο ASTM D-6469 (Standard Guide for Microbial Contamination in Fuel and Fuel Systems).

### **2.3.2.9 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ**

Τα καύσιμα αεροστροβίλων ενδέχεται να είναι επικίνδυνα αν δε διαχειρίζονται καταλλήλως. Καταρχάς, και πρωτίστως, αναφλέγονται και καίγονται εύκολα. Οι ατμοί του καυσίμου δεν καίγονται πάντα, αλλά μόνο όταν το μίγμα ατμού και αέρα βρίσκεται ανάμεσα στα όρια αναφλεξιμότητας. Μίγμα με ανεπαρκή ποσότητα ατμού (κάτω από το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας) ή με μεγάλη ποσότητα ατμού (πάνω από το ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας) δεν καίγεται. Τα καύσιμα αεροστροβίλων τύπου κηροζίνης έχουν όρια αναφλεξιμότητας τις τιμές 0,6% (κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας) και 4,7% (άνωτερο όριο αναφλεξιμότητας) κατ' όγκο περιεκτικότητας ατμού σε αέρα. Τα καύσιμα τύπου "wide cut" έχουν όρια αναφλεξιμότητας τις τιμές 1,3% και 8%.

Στις συνήθεις συνθήκες το μίγμα ατμού-αέρα για καύσιμο τύπου κηροζίνης, βρίσκεται κάτω από το κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας. Όμως με αύξηση της θερμοκρασίας η συγκέντρωση ατμού στον αέρα αυξάνεται, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να βρεθεί το μίγμα μέσα στα όρια αναφλεξιμότητας. Τα πιο πτητικά καύσιμα τύπου "wide cut", το μίγμα ατμού-αέρα συχνά βρίσκεται σε εύφλεκτη κατάσταση.

Το ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας εξαρτάται από την τάση ατμών του καυσίμου. Καύσιμα με τάση ατμών 18 kPa αναμένεται να έχουν θερμοκρασία ανώτερου ορίου αναφλεξιμότητας τους 18°C. [4]

- Σημείο Ανάφλεξης

Το σημείο ανάφλεξης είναι η πιο γνωστή ιδιότητα των καυσίμων που δίνει μια ένδειξη της αναφλεξιμότητας τους. Για τον προσδιορισμό του σημείου ανάφλεξης σε καύσιμο αεροστροβίλων χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι ASTM D-56 (Tag) και IP-170 (Abel), σύμφωνα με τις οποίες προσάγεται μια μικρή φλόγα σε δείγμα καυσίμου που θερμαίνεται, και καταγράφεται η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται ανάφλεξη των ατμών.

Το σημείο ανάφλεξης δίνει επίσης μια ένδειξη της επικινδυνότητας του καυσίμου για ανάφλεξη σε συνθήκες αποθήκευσης. Τέλος, μέσω του σημείου ανάφλεξης μπορεί να εντοπιστεί έγκαιρα πιθανή ανάμιξη του καυσίμου με κάποιο ελαφρότερο.[1], [4]

### **2.3.3.0 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.**

Τα καύσιμα αεροστροβίλων είναι ένα μίγμα πολλών διαφορετικών υδρογονανθράκων. Σύγχρονες αναλυτικές τεχνικές δεν είναι αρκετά ικανές να διαχωρίσουν και να επισημάνουν όλες τις μεμονωμένες μοριακές ενώσεις που συνιστούν τα καύσιμα αεροστροβίλων, ο αριθμός των οποίων θεωρείται ότι ξεπερνάει τις χίλιες. Το μέγεθος των ενώσεων (μοριακά βάρη και αριθμός ατόμων άνθρακα) εξαρτάται -περιορίζεται- από την απόσταση, το σημείο ψύξης, τις ναφθαλίνες και από απαιτήσεις για το σημείο καπνού του προϊόντος. Τα καύσιμα τύπου κηροζίνης έχουν αριθμό ατόμων άνθρακα που κυμαίνεται, μεταξύ 8 και 16, ενώ τα "wide cut" μεταξύ 5 και 15. [4],[1]

Οι περισσότεροι από τους υδρογονάνθρακες των καυσίμων αεροστροβίλων είναι παραφίνες, ναφθένια ή αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Όταν τα καύσιμα αεροστροβίλων του ίδιου τύπου διαφέρουν, είναι επειδή περιέχουν διαφορετικά ποσοστά ενώσεων από τις προαναφερθείσες τρεις κατηγορίες.

Είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να αναπτυχθεί το πως οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των συστατικών ενώσεων επηρεάζουν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ολόκληρου του καυσίμου καθώς και τις επιπτώσεις αυτών στους κινητήρες αεροστροβίλων.[4]

### 2.3.3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Στον πίνακα ( Πίνακας 2-3) που ακολουθεί παρατίθενται τα σημεία βρασμού και τα σημεία πήξης των πιο αντιπροσωπευτικών υδρογονανθράκων των καυσίμων αεριοστροβίλων. Για υδρογονάνθρακες της ίδιας κατηγορίας το σημείο βρασμού αυξάνει καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των ατόμων του άνθρακα.. Για υδρογονάνθρακες με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα η σειρά αύξησης του σημείου βρασμού κατά κατηγορία είναι: ισοπαραφίνες, n-παραφίνες, ναφθένια και αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Η διαφορά των σημείων βρασμού (40-50 °C ) μεταξύ

Όνομασία Ένωσης	Μοριακός Τύπος	Κατηγορία Υδ/κων	Σημείο Βρασμού (°C)	Σημείο Πήξης (°C)
n-Οκτάνιο	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	η-Παραφίνες	125,7	-56,8
2-μέθυλοεπτάνιο	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Ισοπαραφίνες	117,6	-109,0
1-μέθυλο-1-αιθυλοκυκλοπεντάνιο	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	Ναφθένια	121,5	-143,8
αιθυλοκυκλοεξάνιο	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	Ναφθένια	131,8	-11,3
ο-Ξυλένιο	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Αρωματικοί	144,4	-25,2
ρ-Ξυλένιο	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	Αρωματικοί	138,4	+13,3
Cis-Δεκαλίνη	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>	Ναφθένια	195,8	-43,0
Τετραλίνη	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	Αρωματικοί	207,6	-35,8
Ναφθαλίνη	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	Αρωματικοί	217,9	+80,3
n- Δωδεκάνιο	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	η-Παραφίνες	216,3	-9,6

Πίνακας 2-3 : Σημεία βρασμού και Σημεία πήξης αντιπροσωπευτικών υδρογονανθράκων που περιέχονται σε καύσιμα αεριοστροβίλων. <sup>[4]</sup>

ισοπαραφινών και αρωματικών υδρογονανθράκων με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα είναι μεγαλύτερη από τη διαφορά των σημείων βρασμού ενώσεων της ίδιας κατηγορίας που όμως διαφέρουν κατά ένα άτομο άνθρακα (περίπου  $20^{\circ}\text{C}$ ). Κατά συνέπεια οι ενώσεις που έχουν σημείο βρασμού κοντά στους  $225^{\circ}\text{C}$  -περίπου στη μέση των σημείων βρασμού των ενώσεων των καυσίμων τύπου κηροζίνης- θα μπορούσαν να είναι αρωματικοί υδρογονάνθρακες με 10 άτομα άνθρακα, ναφθένια με 11 ή παραφίνες με 12.

Σε ότι αφορά το σημείο πήξης, έχουμε αύξηση του καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των ατόμων άνθρακα, αλλά επιπλέον επηρεάζεται έντονα από τη μοριακή δομή των ενώσεων. Ενώσεις όπως οι κανονικές παραφίνες και οι μη υποκαταστημένοι αρωματικοί υδρογονάνθρακες κρυσταλλώνονται σε πολύ πιο υψηλές θερμοκρασίες από άλλες ενώσεις, με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα, και αυτό επειδή έχουν κατάλληλη μορφή που επιτρέπει το σχηματισμό.[4]

Ακολουθούν πίνακες που παραθέτουν τιμές πυκνότητας και θερμότητας καύσης των πιο αντιπροσωπευτικών ενώσεων που συνιστούν τα καύσιμα αεροστροβίλων. Η πυκνότητα αυξάνει με ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα εφόσον αναφερόμαστε σε ενώσεις της ίδιας κατηγορίας. Για τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι οι πυκνότερες ενώσεις και ακολουθούν τα ναφθένια και οι παραφίνες. [4]

Όνομασία Ένωσης	Αριθμός Ανθράκων	Κατηγορία Υδ/κων	Πυκνότητα στους 20 °C
n-Οκτάνιο	8	η-Παραφίνες	0.7027
2-μέθυλοεπτάνιο	8	Ισοπαραφίνες	0.6979
1-μέθυλο-1-αιθυλοκυκλοπεντάνιο	8	Ναφθένια	0.7809
αιθυλοκυκλοεξάνιο	8	Ναφθένια	0.7879
ο-Ξυλένιο	8	Αρωματικοί	0.8801
ρ-Ξυλένιο	8	Αρωματικοί	0.8610
Cis-Δεκαλίνη	10	Ναφθένια	0.8967
Τετραλίνη	10	Αρωματικοί	0.9695
Ναφθαλίνη	10	Αρωματικοί	1.1750
n- Δωδεκάνιο	12	η-Παραφίνες	0.7488

Πίνακας 2-4: Τιμές Πυκνότητας αντιπροσωπευτικών υδρογονανθράκων που περιέχονται σε καύσιμα αεριοστροβίλων. <sup>[4]</sup>

Για τις ενώσεις με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες έχουν τη μικρότερη θερμότητα καύσης (ενεργειακό περιεχόμενο) ανά μονάδα μάζας και οι παραφίνες τη μεγαλύτερη, δηλαδή, οι πυκνότερες ενώσεις έχουν το μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα μάζας. Η αντίστροφη σειρά ισχύει για τη θερμότητα καύσης ανά μονάδα όγκου (δηλαδή τώρα οι παραφίνες θα έχουν τη μικρότερη θερμότητα καύσης ανά μονάδα όγκου και οι αρωματικές ενώσεις τη μεγαλύτερη). Αξίζει να σημειωθεί πως η ανωτέρα σχέση μεταξύ πυκνότητας και θερμότητας καύσης ισχύει και για τα καύσιμα. Για παράδειγμα τα ελαφρύτερα (με μικρή πυκνότητα) καύσιμα, όπως η βενζίνη, έχουν υψηλή τιμή θερμότητας καύσης ανά μονάδα μάζας, ενώ βαρύτερα καύσιμα, όπως το ντίζελ, έχουν υψηλή τιμή θερμότητας καύσης ανά μονάδα όγκου.

Το ιξώδες επηρεάζεται περισσότερο από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα παρά από την κατηγορία των υδρογονανθράκων. Για δεδομένο αριθμό των ατόμων

άνθρακα τα ναφθένια έχουν ελαφρώς υψηλότερο ιξώδες από τις παραφίνες και τις αρωματικές ουσίες. [4]

### 2.3.3.2 ΝΕΡΟ ΣΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Το νερό μπορεί να εμφανιστεί στο καύσιμο σε τρεις διαφορετικές μορφές: διαλυμένο μέσα στο καύσιμο, σαν μία ξεχωριστή υγρή φάση (ελεύθερο νερό) ή τέλος σε μορφή γαλακτώματος νερού-καυσίμου.

- Διαλυμένο νερό

Το νερό είναι ελαφρώς διαλυτό στα καύσιμα αεριοστροβίλων (και αντίστροφα το καύσιμο παρουσιάζει ακόμα μικρότερη διαλυτότητα στο νερό). Το ποσό του νερού που μπορεί να διαλυθεί στο καύσιμο αυξάνεται με την αντίστοιχη αύξηση της ποσότητας των αρωματικών ουσιών και με τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα το νερό διαλύεται περισσότερο από κάθε άλλο υδρογονάνθρακα στο βενζόλιο (σε μονο αρωματική ένωση το νερό μπορεί να διαλυθεί πέντε ως δέκα φορές περισσότερο από έναν άλλο υδρογονάνθρακα με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα).

Ένα τυπικό καύσιμο τύπου κηροζίνης κορεσμένο σε νερό περιέχει 40 έως 80 ppm διαλυμένο νερό στους 21°C. Με αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να διαλυθεί περισσότερο νερό, ενώ με μείωση της θερμοκρασίας το νερό διαχωρίζεται από το καύσιμο και διατηρείται μ'αυτό σε επαφή ως μία ξεχωριστή -υγρή φάση (ελεύθερο νερό).

Πολλές φορές καύσιμα μη κορεσμένα σε νερό (και απουσία ελεύθερου νερού) είναι δυνατό να πάρουν νερό από τον αέρα, ποσότητα που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία του αέρα. Καύσιμο σε επαφή με αέρα, που έχει σχετική υγρασία περίπου 50 τοις εκατό, περιέχει τη μισή ποσότητα νερού απ' αυτή που θα είχε το καύσιμο σε κορεσμένη κατάσταση στην ίδια θερμοκρασία.

Τα παραπάνω για να ισχύουν απαιτούν την προϋπόθεση ότι το καύσιμο βρίσκεται σε ισορροπία με αέρα ή ελεύθερο νερό. Καύσιμο το οποίο έχει μεγάλη διεπιφάνεια καυσίμου-αέρα (ή καυσίμου-νερού) σε σχέση με την ποσότητά-όγκου του μπορεί να φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας σε ελάχιστο χρόνο (της τάξης των λεπτών). Εντούτοις, εάν ο όγκος των καυσίμων είναι μεγάλος και η περιοχή της διεπιφάνειας είναι περιορισμένη, συνθήκες που επικρατούν σε δεξαμενές αποθήκευσης, ο χρόνος που απαιτείται για την ισορροπία είναι πολύ μεγαλύτερος (σε τέτοιες συνθήκες



υπάρχουν ποσότητες καυσίμου οι οποίες βρίσκονται πολλά μέτρα κάτω από τη διεπιφάνεια, άρα η επαφή τους με νερό είναι σπάνια). Στην πραγματικότητα, τα καύσιμα σε μια μεγάλη δεξαμενή δεν μπορούν ποτέ να φτάσουν σε ισορροπία με το νερό δεδομένου ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία του αέρα μεταβάλλονται συνεχώς.[14]

- Ελεύθερο νερό

Όπως έχει προαναφερθεί τα καύσιμα αεριοστροβίλων περιέχουν ελεύθερη ποσότητα νερού, η οποία βρίσκεται σε ξεχωριστή υγρή φάση. Το νερό όντας πυκνότερο από τα καύσιμα αεριοστροβίλων, και υπό την επιρροή της βαρύτητας, διαμορφώνει ένα στρώμα το οποίο βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο απ' ότι το στρώμα του καυσίμου. Το μίγμα νερού-καυσίμου διαχωρίζεται γρήγορα σε δύο φάσεις ακόμα και ύστερα από ανάμιξη. Η ταχύτητα διαχωρισμού και ο σχηματισμός διεπιφανείας καυσίμου-νερού είναι ενδείξεις της διαχωριστικότητας νερού ενός καυσίμου (water separability). Όπως προαναφέρθηκε, με μείωση της θερμοκρασίας, το νερό διαχωρίζεται από το καύσιμο σχηματίζοντας μικρά σταγονίδια που συχνά ονομάζεται νερό σε διεσπαρμένη φάση (dispersed water). Ακόμα και αν δε σταθεροποιούνται από τα επιφανειοδραστικά (surfactants / surface-active agent), τα σταγονίδια συγχωνεύονται αργά λόγω του μικρού μεγέθους τους. Τα σταγονίδια αυτά προσδίδουν στο καύσιμο μία μουντή εμφάνιση. Το καύσιμο επανέρχεται στη φυσιολογική του μορφή αν θερμανθεί τόσο, ώστε να ξαναδιαλυθεί το νερό.

### **2.3.3.3 ΠΡΟΣΘΕΤΑ**

Τα πρόσθετα είναι χημικές ουσίες, διαλυτές στα καύσιμα, οι οποίες προστίθενται σε αυτά σε μικρές ποσότητες και ενισχύουν ή διατηρούν ιδιότητες που είναι σημαντικές για την απόδοση ή και την διαχείριση των καυσίμων.

Χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία όλων των παραγώγων του πετρελαίου, αλλά για τα καύσιμα αεριοστροβίλων η κατάσταση παρουσιάζει ιδιαιτερότητα αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο εκείνα τα πρόσθετα που έχουν εγκριθεί. Στον Πίνακα 2-5 παρατίθενται πρόσθετα που έχουν εγκριθεί από μερικές από τις σπουδαιότερες προδιαγραφές των αεροπορικών καυσίμων [4]

Η χρήση των προσθέτων είναι η κύρια διαφορά μεταξύ καυσίμων της πολεμικής και της πολιτικής αεροπορίας. Τα καύσιμα αεριοστροβίλων της πολεμικής

αεροπορίας περιέχουν τουλάχιστον-τρία πρόσθετα. Το Jet A-1 περιέχει πρόσθετο για τη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και πολλές φορές και αντιοξειδωτικό Το Jet A στις Η.Π.Α δεν περιέχει κανένα πρόσθετο ή πιθανώς κάποιες φορές μόνο αντιοξειδωτικό. [4]

Τύπος Προσθέτου	Jet A ASTM D 1655	Jet A1 DEF STAN 91-91	JP4 MIL- DTL 5624	JP -5 MIL- DTL 5624	JP-8 MIL- DTL 3133
Αντιοξειδωτικό	Επιτρέπεται	Απαιτείται	Απαιτείται	Απαιτείται	Απαιτείται
Πρόσθετο μεταλλικής απενεργοποίησης	Επιτρέπεται	Επιτρέπεται	Κατόπιν συμφωνίας	Κατόπιν συμφωνίας	Κατόπιν συμφωνίας
Βελτιωτικό ηλεκτρικής αγωγιμότητας	Επιτρέπεται	Απαιτείται	Απαιτείται	Κατόπιν συμφωνίας	Απαιτείται
Αντιδιαβρωτικό-Βελτιωτικό λιπαντικής ικανότητας	Δεν Επιτρέπεται	Κατόπιν συμφωνίας	Απαιτείται	Απαιτείται	Απαιτείται
Ανασταλτικό δημιουργίας πάγου	Κατόπιν συμφωνίας	Κατόπιν συμφωνίας	Απαιτείται	Απαιτείται	Απαιτείται
Βιοκτόνο	Κατόπιν συμφωνίας	Κατόπιν συμφωνίας	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται
Βελτιωτικό θερμικής σταθερότητας	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται	Δεν Επιτρέπεται	Κατόπιν συμφωνίας

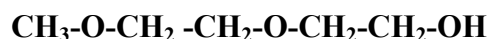
Πίνακας 3-5: Εγκεκριμένοι τύποι προσθέτου για καύσιμα αεροστροβίλων (\* Όταν το JP-8 περιέχει προσθετό για τη θερμική σταθερότητα ονομάζεται JP8 +100)<sup>[4]</sup>

Για να μπορέσει ένα πρόσθετο να εγκριθεί για τη χρήση αεροστροβίλων, πρέπει να υποβληθεί σε εκτενείς δοκιμές ώστε να αποδειχθεί ότι είναι μεν αποτελεσματικό και ότι αφετέρου δεν επηρεάζει αρνητικά άλλες ιδιότητες του καυσίμου. Για να διασφαλιστούν τα παραπάνω το πρόσθετο πρέπει να εξεταστεί με ποσότητα περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη δόση παρουσία και άλλων προσθέτων

### 2.3.3.3.1 ΑΝΤΙΠΑΓΩΤΙΚΟ ΠΡΟΣΘΕΤΟ

Πολλές φορές στις δεξαμενές καυσίμου επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά σε πτήσεις σε μεγάλο ύψος, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πάγου. Το νερό προϋπάρχει διαλυμένο στο καύσιμο που φορτώνεται στα αεροσκάφη και στη συνέχεια με την πτώση της θερμοκρασίας διαχωρίζεται από τον κύριο όγκο του καυσίμου. Τα πολιτικά αεροσκάφη έχουν θερμοαντήρες στα κύρια φίλτρα καυσίμου με σκοπό το λιώσιμο της όποιας ποσότητας καυσίμου συλλέγεται. Όμως πολλά στρατιωτικά αεροσκάφη δεν έχουν τέτοιους θερμοαντήρες και υπάρχει δυσκολία στη ροή καυσίμου κατά τον πιθανό σχηματισμό πάγου.

Το πρόσθετο που χρησιμοποιείται σήμερα για αυτό το σκοπό στα καύσιμα αεροστροβίλων Jet A, Jet A-1 και της πολεμικής αεροπορίας των Η.Π.Α., έχει χημικό τύπο που δίνεται παρακάτω (di-EGME).



Το πρόσθετο αυτό είναι ελαφρώς διαλυτό στο καύσιμο και πολύ διαλυτό στο νερό. Καθώς το πρόσθετο είναι ελαφρώς διαλυτό στο καύσιμο, υπάρχει η απαίτηση να προστίθεται σε μικρές ποσότητες και με καλή ανάμιξη έτσι ώστε να υπάρξει πλήρης διάλυση του στο καύσιμο. Συγκεκριμένα προστίθεται σε συγκέντρωση 0,1 -0,15% κατ'όγκο. Η παραπάνω ανάγκη γίνεται επιτακτική για χαμηλές θερμοκρασίες. Στην πράξη το πρόσθετο προστίθεται με έγχυση κατά ελεγχόμενη ποσότητα σε ρεύμα καυσίμου.

Αν καύσιμα που περιέχουν τέτοια πρόσθετα έρθουν σε επαφή με ελεύθερο νερό τότε το πρόσθετο θα εξαχθεί από το καύσιμο και θα σχηματίσει μία παχιά, ζελατινώδης φάση με το νερό (κατάσταση σαφώς απαράδεκτη). Για να αποφευχθεί το παραπάνω φαινόμενο το πρόσθετο δε προστίθεται στο καύσιμο κατά τις διεργασίες διύλισης σε κάποιο σημείο του συστήματος διανομής του καυσίμου. Στα καύσιμα της πολεμικής αεροπορίας συνήθως προστίθεται στον αερολιμένα ή κατά τη διάρκεια της πτήσης.

### **2.3.3.3.2 ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΠΟΥ ΒΕΛΤΙΩΝΕΙ ΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ**

Τη δεκαετία του 90' η Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α άρχισε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη καυσίμων με βελτιωμένη θερμική σταθερότητα. Χρησιμοποιήθηκαν, έτσι λοιπόν, πρόσθετα που βελτίωναν τη θερμική σταθερότητα των καυσίμων κατά 100°K (60°C), από 325°F στους 425 °F. Στο «πακέτο» αυτό των πρόσθετων ουσιών υπάρχει διαλυτικό το οποίο βοηθά στη διάλυση των συστατικών του, με σκοπό την αποφυγή σχηματισμού ιζήματος και κομμιωδών ουσιών. Το πρόσθετο αυτό είναι γνωστό ως "+100" (συν εκατό). Τα καύσιμα της Πολεμικής Αεροπορίας τω Η.Π.Α που περιέχουν την πρόσθετη αυτή ουσία (όπως έχει προαναφερθεί) ονομάζονται JP-8+100.

### **2.3.3.3.3 ΑΝΤΙΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟ ΠΡΟΣΘΕΤΟ**

Το οξυγόνο, το οποίο περιέχεται σε μικρές ποσότητες αέρα που είναι διαλυμένες στο καύσιμο, προσβάλλει τα δραστικά συστατικά του καυσίμου. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται μέσω αλυσωτής αντιδράσεως οξειδωσης.

Τα αντιοξειδωτικά λειτουργούν διακόπτοντας την αλυσωτή αυτή αντίδραση, εμποδίζοντας έτσι κυρίως το σχηματισμό υπεροξειδίων και διαλυμένων κομμιωδών ουσιών. Τα υπεροξείδια προσβάλλουν τα ελαστικά μέρη του συστήματος καυσίμου ενώ οι κομμιώδεις ουσίες εναποθέτονται σε μηχανικά εξαρτήματα και φίλτρα καυσίμου.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ενώ τα αντιοξειδωτικά έχουν την ικανότητα να βελτιώνουν τη σταθερότητα αποθήκευσης (storage stability) του καυσίμου δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικά σε ότι αφορά τη θερμική σταθερότητα..

Οι ολεφίνες, η πιο δραστική κατηγορία των υδρογονανθράκων, είναι πιο ευπαθείς σε οξειδωτική αποικοδόμηση (degradation). Εντούτοις, τα καύσιμα "Straight Run" περιέχουν ελάχιστη έως μηδενική ποσότητα ολεφινών. Επίσης τα καύσιμα που έχουν υποστεί υδρογονοκατεργασία (υδρογονοαποθείωση) δεν περιέχουν καθόλου ολεφίνες. Τα καύσιμα "Straight Run" συχνά περιέχουν φυσικά αντιοξειδωτικό. έτσι αυτά τα καύσιμα έχουν συνήθως οξειδωτική σταθερότητα και κατ'αυτό τον τρόπο δεν απαιτούνται πρόσθετα αντιοξειδωτικά.

Όμως, υδρογονοκατεργασία, ακόμα και ήπια υδρογονοκατεργασία, για αφαίρεση μερκαπτανών, είναι δυνατόν να αφαιρέσει τα φυσικά αυτά αντιοξειδωτικά, με συνέπεια το σχηματισμό καυσίμων λιγότερο σταθερών. Για τους παραπάνω λόγους στα καύσιμα που έχουν υποστεί υδρογονοκατεργασία προστίθενται αντιοξειδωτικά πρόσθετα. Για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα συνηθίζεται τα αντιοξειδωτικά να προστίθενται αμέσως μετά τη υδρογονοκατεργασία.

Τα αντιοξειδωτικά αυτά είναι συνήθως δευτεροταγείς ή τριτοταγείς φαινόλες και η μέγιστη τους επιτρεπόμενη ποσότητα στα καύσιμα είναι 24 mg/L. [4]

#### **2.3.3.3.4 ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Οι μεταλλικοί απενεργοποιητές είναι πολυδοντικοί υποκατάστατες (χηλικά αντιδραστήρια), δηλαδή συστατικά που έχουν την ικανότητα να σχηματίζουν με ιόντα μετάλλων ενώσεις με αξιοσημείωτη χημική σταθερότητα (χηλικά σύμπλοκα)

Δραστικά μέταλλα όπως ο χαλκός και ο ψευδάργυρος είναι αποτελεσματικοί καταλύτες σε αντιδράσεις οξείδωσης και επίσης μειώνουν τη θερμική σταθερότητα των καυσίμων. Αυτά τα μέταλλα δε χρησιμοποιούνται στα συστήματα καυσίμου των αεριοστροβίλων κινητήρων. Παρολ' αυτά αν το καύσιμο μολυνθεί με αυτά τα μέταλλα, τα πρόσθετα μεταλλικής απενεργοποίησης εμποδίζουν την καταλυτική τους δραστηριότητα.[4]

#### **2.3.3.3.5 ΑΝΤΙΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΡΟΣΘΕΤΟ /ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟ ΛΙΠΑΝΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ:**

Οι δεξαμενές και οι σωληνώσεις του συστήματος διανομής καυσίμου των αεριοστροβίλων κινητήρων αρχικά κατασκευάζονταν χωρίς επίστρωση χάλυβα. Έτσι η χρησιμοποίηση αντιδιαβρωτικών προσθετά καθίσταται αναγκαία αφού εμποδίζουν το ελεύθερο νερό και το οξυγόνο να προκαλέσουν οξείδωση και διάβρωση.

Αξίζει να σημειωθεί πως σε αντίθεση με άλλα πρόσθετα , η σύνθεση των αντιδιαβρωτικών καλύπτεται από δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Συνήθως τα αντιδιαβρωτικά πρόσθετα αποτελούνται από διβασικά οξέα.

Τα πρόσθετα για βελτίωση λιπαντικής ικανότητας χρησιμοποιούνται επειδή τα καύσιμα αεριοστροβίλων που έχουν υποστεί υδρογονοκατεργασία έχουν πολύ χαμηλή λιπαντική ικανότητα. Περιέχουν μία πολική ομάδα που προσκολλάται στις

επιφάνειες των μετάλλων, σχηματίζοντας έτσι ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα από το πρόσθετο. Το στρώμα αυτό λειτουργεί ως λιπαντικό όταν δύο μεταλλικές επιφάνειες έρχονται σε επαφή. Και η διάβρωση και η λίπανση είναι φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια σωμάτων, πράγμα που δικαιολογεί πως τα αντιδιαβρωτικά πρόσθετα βελτιώνουν και τη λιπαντική ικανότητα των καυσίμων.

#### **2.3.3.3.6 ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ**

Τα καύσιμα αεριοστροβίλων έχουν χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έτσι δημιουργείται πρόβλημα ασφάλειας λόγω του στατικού ηλεκτρισμού ( συνήθως η εμφάνιση του οφείλεται στον υψηλό ρυθμό μεταφοράς καυσίμου στα σύγχρονα συστήματα διανομής καυσίμου).

Για τους ανωτέρω λόγους έχουν αναπτυχθεί πρόσθετες ουσίες που βελτιώνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα των καυσίμων αεριοστροβίλων. Τα πρόσθετα αυτά συχνά αναφέρονται ως πρόσθετα απώλειας στατικού ηλεκτρισμού - αντιστατικά πρόσθετα- (static dissipater additiver- S.D.A.). Όταν χρησιμοποιείται το πρόσθετο η αγωγιμότητα του καυσίμου θα πρέπει να παίρνει τιμές μεταξύ 50 και 450 CU. Το μόνο πρόσθετο που έχει εγκριθεί για αυτή τη χρήση στα καύσιμα αεριοστροβίλων είναι το Stadis®450, το οποίο αποτελεί ευρεσιτεχνία.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα που μπορεί να χρησιμοποιείται στο καύσιμο είναι 3 mg/L. Σημειώνεται πως αύξηση της θερμοκρασίας του καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αγωγιμότητας και το αντίστροφο, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της ποσότητας του πρόσθετου που θα πρέπει να περιέχεται στο καύσιμο.

#### **2.3.3.3.7 ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ**

Η χρήση του Ιχνηθέτη Α (Trace A) έχει εγκριθεί πρόσφατα για τη χρήση σε καύσιμα αεριοστροβίλων, τύπου Jet A και Jet A-1, για να βοηθήσει στην ανίχνευση ενδεχόμενης διαρροής στο σύστημα διαχείρισης καυσίμου. Το πρόσθετο αυτό είναι αέριο που δύναται να ανιχνευθεί σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Ο Ιχνηθέτης Α (Trace A) αναμιγνύεται με το καύσιμο κατά την άντληση του τελευταίου μέσω του συστήματος διανομής. Έτσι η διαρροή οποιασδήποτε ποσότητας καυσίμου θα έχει ως αποτέλεσμα τη διαφυγή του Ιχνηθέτη Α (Trace A). Η παρουσία αυτού του αερίου έξω

από το σύστημα καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπιστεί η πιθανή διαρροή.

#### **2.3.3.3.8 ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΟ (ΒΙΟΚΤΟΝΟ)**

Τα βιοκτόνα-ζιζανιοκτόνα σχεδιάζονται έτσι ώστε να καταστρέφουν μικροοργανισμούς, όπως τα βακτήρια και οι μύκητες, που ενδέχεται να βρίσκονται στα καύσιμα αεριοστρόβιλων μόνα γενικά αποδεκτά, διαλυτά σε καύσιμα, βιοκτόνα είναι το Biofor JF (U.S. Borax), και το Kathon. Η δόση του Biofor IF που μπορεί να καταστρέψει τους μικροοργανισμούς είναι 226 mg/L. Δεδομένου ότι τα βιοκτόνα είναι τοξικά θα πρέπει στρώματα ύδατος που περιέχουν βιοκτόνα να απομακρύνονται με ιδιαίτερη προσοχή. [4]

## 2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Στούρνας Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., «Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2002.
2. Καρκανιάς Κ., «Αεροστρόβιλοι Κινητήρες», Εκδόσεις ΑΛΦΑ, Αθήνα.
3. Μαθιουδάκη Κ., «Εισαγωγή στους Αεροπορικούς Κινητήρες Στροβιλοαντιδραστήρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 1997.
4. "Aviation Fuels Technical Review", Chevron Products Company, 2000.  
  
([www.chevron.com](http://www.chevron.com))
5. Treager, Irwin E, Mc Graw-Hill, "Aircraft Gas Turbine Engine Technology", GLENCOE Aviation Technology Series, Third Edition, 1996
6. R.E.KIRK, D.F, D.F.OTHMER: «Encyclopedia of Chemical Technology John Wiley Interscience Publications N.Y. U.S.A, Vol. 3. 4th Edition. 1995.
7. "Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry", V.C.H. Verlagsgesellschaft GmbH, Weinheim, B.R.D., Vol. 3, 5<sup>th</sup> Edition. 1990.
8. <http://www.bp.com>, "History of Jet Fuel\*".
9. <http://www.shell.com> "Shell Aviation Fuels".
10. Michael J. Kroes, Thomas W. Wild, 'Aircraft Powerplants'. GLENCOE Aviation Technology Series, 7<sup>th</sup> Edition, 1994.
11. Γεώργιος Β. Κυριακόπουλος. «Τεχνολογία Καυσίμων: Η Καύσις - Θεωρία και Εφαρμογή-», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2η Έκδοση, Αθήνα 1978.
12. D. M. Himmelblau, «Βασικές Αρχές και Υπολογισμοί στη Χημική Μηχανική», 3<sup>η</sup> Έκδοση, Θεσσαλονίκη 1986.
13. J. Kerrebrock: "Aircraft Engines and Gas Turbines", Massachusetts Institute of Technology, Second Edition, 1992.
14. Σ. Λιοδάκης, "Αναλυτική Χημεία", Εκδόσεις Γιαπασωτηρίου, Αθήνα 2001



15. "JP-8: The Single Fuel forward. An Information Compendium", U.S. Army Tank-automotive and Armaments Command Research, Development, and Engineering Center, May 1991

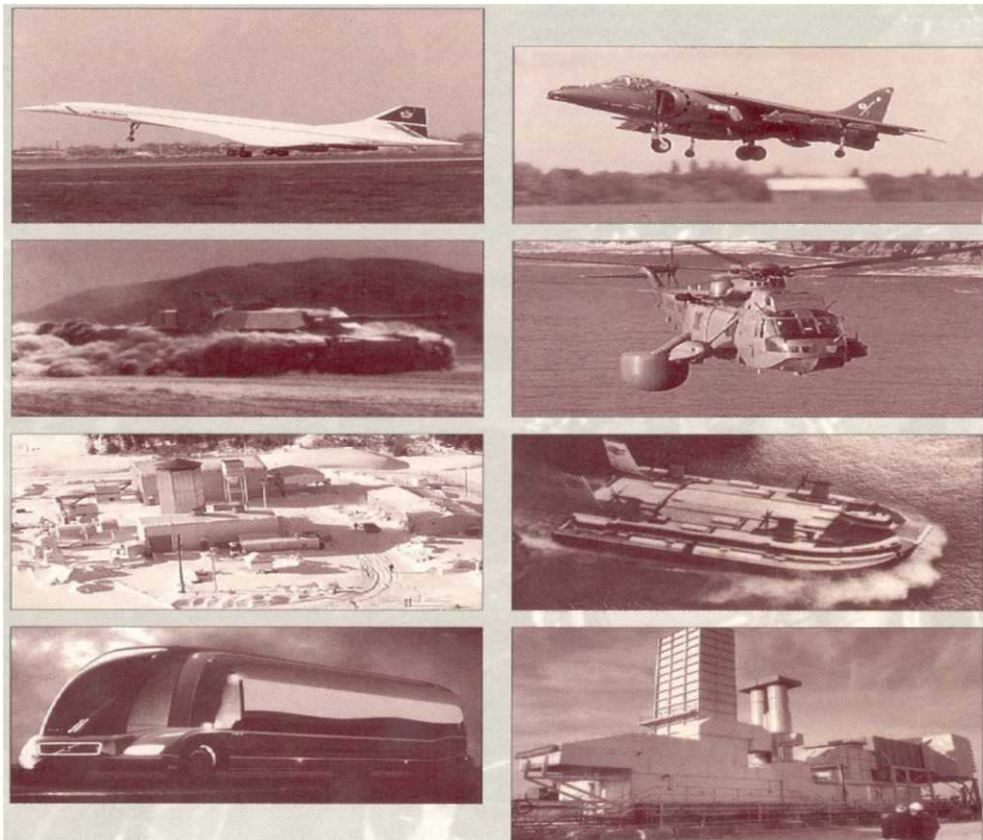
## Κεφάλαιο 3

### Αεροπορικοί Στροβιλοκινητήρες

#### 3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ - ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Η ιδέα της χρήσης της φυσικής αρχής της δράσης - αντίδρασης για την προώθηση μηχανών είναι πολύ παλιά, αλλά ο καθορισμός των τριών βασικών νόμων της κίνησης που απετέλεσαν τη θεωρητική βάση των σύγχρονων κινητήρων αεριωθουμένων οφείλεται στον Άγγλο φιλόσοφο και μαθηματικό Ισαάκ Νεύτωνα, που τους διατύπωσε με σαφή μορφή το 1687.

Η σύλληψη των κινητήρων jet θεωρείται ότι ανήκει στον Βρετανό μηχανικό Frank Whittle ο οποίος το 1930 απέκτησε δικαιώματα ευρεσιτεχνίας για μία μηχανή που αποτελείτο από έναν πολυβάθμιο αξονικό συμπιεστή, ακολοθούμενο από φυγόκεντρο συμπιεστή, δακτυλιοειδή θάλαμο καύσης, μονοβάθμιο αξονικό στρόβιλο και



ακροφύσιο. Ο Whittle ήταν ο πρώτος που συνέδεσε άμεσα στρόβιλο και συμπιεστή δημιουργώντας έτσι τον αρχέτυπο turbojet. Η συνέχιση της εξέλιξης των στροβιλοκινητήρων υπήρξε ραγδαία, αρχικά με πρωτοπόρους τους Βρετανούς και τους Γερμανούς και αργότερα με το πέρασμα της τεχνολογικής σκυτάλης στις ΗΠΑ.

Γενικά, ο αεροπορικός στροβιλοκινητήρας (αεριοστρόβιλος) χαρακτηρίζεται ως μια τυπική θερμική μηχανή από την άποψη ότι χρησιμοποιεί ένα αέριο μέσο για να αναπτύξει μηχανική ισχύ ή ώση. Ο κύκλος Brayton (ή κύκλος Joule) περιγράφει την όλη λειτουργία του αερίου μέσου.

### **3.2. TURBOJET ΚΑΙ TURBOFAN - ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΦΙΛΟΣΟΦΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Οι στροβιλοκινητήρες turbojet απετέλεσαν σίγουρα το πλέον επαναστατικό βήμα στον τομέα της προώθησης αεροσκαφών αλλά έπασχαν από ένα σημαντικό μειονέκτημα: η προωθητική τους απόδοση, αν και ήταν ασύγκριτα καλύτερη από εκείνη των εμβολοφόρων κινητήρων, κυμαινόταν κάτω από το 60% στις υποηχητικές ταχύτητες. Η απάντηση στο πρόβλημα δόθηκε μέσα από την αξιοποίηση του θεωρήματος της ορμής με την αύξηση της παροχτευμένης μάζας αέρα και τη μεταπήδηση σε ένα νέο τύπο κινητήρα που κυριάρχησε απόλυτα στις αεροπορικές εφαρμογές κατά τις τελευταίες δεκαετίες που ονομάστηκε turbofan.

#### **3.2.1 TURBOJET: Η ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

Οι σύγχρονοι στροβιλοκινητήρες ταξινομούνται σε τέσσερις βασικούς τύπους (turbojet, turbofan, turboprop και turboshaft) ανάλογα με το έργο που επιτελούν και τη μέθοδο παραγωγής ώσης που ακολουθούν. Από αυτούς οι κινητήρες turbojet και turbofan είναι οι μόνοι που παράγουν προωστικές δυνάμεις απ' ευθείας από το ρεύμα καυσαερίων χωρίς τη μεσολάβηση βοηθητικών συστημάτων κίνησης. Οι turbojet αποτελούν τον πιο πρώιμο τύπο στροβιλοκινητήρα και τα κύρια δομικά τους μέρη είναι η διάταξη εισαγωγής (intake), ο συμπιεστής (compressor), ο θάλαμος καύσης (combustion chamber), ο στρόβιλος (turbine) και το ακροφύσιο (exhaust duct ή nozzle). Στοιχεία της παροιμιώδους αυτής απλότητας αποτελούν η έλλειψη σχεδόν κάθε κινηματικού μηχανισμού (κυρίου και βοηθητικού διανομής), η απουσία ελευθέρων μαζικών δυνάμεων, η μεγάλη ομοιομορφία στρεπτικής ροπής και

ταχύτητας περιστροφής, η απλούστευση των προβλημάτων στεγανότητας και λιπάνσεως, η στο ελάχιστο ελάττωση των μηχανικών απωλειών, η υψηλή τιμή του προς τα άνω ορίου για την ταχύτητα περιστροφής (το όριο τίθεται μόνο για τη μέγιστη περιφερειακή ταχύτητα των κινητών πτερυγίων) η ταχεία εκκίνηση εκ ψυχρού και η μη ανάγκη ψυκτικού ύδατος (ίσως απαιτείται μικρή ποσότητα για την ψύξη του λιπαντικού ελαίου).

*Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία των παραπάνω μερών του κινητήρα.:*

Ο αέρας αρχικά εισέρχεται στο τμήμα της εισαγωγής το οποίο πρέπει να έχει την κατάλληλη μορφή ώστε να εξασφαλίζει ομαλή ροή αέρα στον συμπιεστή ακόμη και στην περίπτωση που το αεροσκάφος πετά σε διάφορες γωνίες ως προς τη διεύθυνση της κίνησής του, μεταβάλλοντας έτσι τη λεγόμενη γωνία προσβολής.

Ο συμπιεστής είναι μια μηχανική διάταξη με ταχέως περιστρεφόμενα πτερύγια που λειτουργεί ουσιαστικά σαν αεραντλία με σκοπό την αύξηση της πίεσης του διερχόμενου αέρα. Ταυτόχρονα όμως έχουμε και μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα. Οι βασικές παραλλαγές συμπιεστών που συναντώνται είναι οι φυγοκεντρικοί που χρησιμοποιήθηκαν ως το 1950 και οι αξονικοί που έχουν επικρατήσει σήμερα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος συμπίεσης (pressure ratio, PR) εξόδου/εισόδου του συμπιεστή τόσο οικονομικότερη γίνεται η λειτουργία του κινητήρα. Οι σημερινοί στροβιλοκινητήρες παρουσιάζουν έναν λόγο συμπίεσης που αγγίζει το 45:1 ενώ η απόδοση του κύκλου τους πλησιάζει το 90%. Κάθε συμπιεστής είναι έτσι κατασκευασμένος ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου προφίλ πτήσης που ορίζεται από έναν αριθμό Mach (ταχύτητα/ταχύτητα του ήχου στον αέρα) και ένα υψόμετρο. Οι συνθήκες αυτές καλούνται σημείο σχεδιασμού (design point, DP) και συνθέτουν εκείνη την κατάσταση στην οποία θεωρητικά ο συμπιεστής μπορεί να αποδώσει τον μέγιστο βαθμό. Σε συνθήκες που απέχουν από το σημείο σχεδιασμού, οι εμπρόσθιες βαθμίδες του συμπιεστή ενός turbojet επιβαρύνονται περισσότερο από εκείνες που βρίσκονται στο μέσον ή στο πίσω μέρος, με συνέπεια να λειτουργούν επικίνδυνα κοντά στο όριο απώλειας στήριξης, εκεί δηλαδή όπου η ροή αποκολλάται και η πτερύγωση αρχίζει να πάλλεται.

Στους πιο επιτυχημένους τύπους turbojet, όπως ο J79 που προωθεί τα αεροσκάφη F-104, F-4, B-58 και Vigilante, η ασφάλεια του κινητήρα επιτυγχάνεται με τη

ρύθμιση της ροής μέσω διαφόρων μεταβλητών οδηγών πτερυγίων εισαγωγής (IGV-Inlet Guide Vanes) του στάτορα (stator) στις εμπρόσθιες βαθμίδες του.

Στην έξοδο του συμπιεστή ο πεπιεσμένος αέρας οδηγείται στον κατασκευασμένο από πυρίμαχα υλικά θάλαμο καύσης όπου το καύσιμο ψεκάζεται και καίγεται εκλύοντας σημαντική πρόσθετη ενέργεια στη ροή αέρα. Οι κατασκευαστικοί περιορισμοί ορίζουν ότι η διαδικασία καύσης θα πρέπει να λάβει χώρα σε χώρο μικρού όγκου και να ολοκληρωθεί με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πίεσης. Κάθε στροβιλοκινητήρας βασίζει τη λειτουργία του στο γεγονός ότι η ενέργεια υπό μορφή θερμότητας ή πίεσης μπορεί να αποθηκευτεί στα μόρια ενός ρευστού και να εξαχθεί πάλι από αυτά σε μεταγενέστερο στάδιο. Η ώση ενός κινητήρα εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του αέρα. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η τελευταία τόσο μεγαλύτερη ώση είναι διαθέσιμη.

Η μάζα τώρα του πεπιεσμένου αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή εισάγεται στον θάλαμο καύσης με ταχύτητα περίπου 150m/sec, η οποία είναι υπερβολικά μεγάλη για να μπορέσει να διατηρηθεί η φλόγα της καύσης. Η απαραίτητη προϋπόθεση της δραστηκής ελάττωσης της ταχύτητας του αέρα επιτυγχάνεται από τη διαμόρφωση του διαχυτή ή διαχυτήρα (diffuser) που έχει το εμπρόσθιο μέρος του θαλάμου καύσης και από τον διάτρητο δίσκο που περιβάλλει τα ακροφύσια ψεκασμού καυσίμου. Τα συνηθέστερα αεροπορικά καύσιμα είναι οι κηροζίνες με κατώτερο σημείο ανάφλεξης ατμών (flash point) τους 48,90C και τελικό σημείο (endpoint) τους 3000C. Η αναλογία μαζών ψεκαζόμενου καυσίμου προς εισερχόμενο αέρα που απαιτείται για την καύση κυμαίνεται από 1:45 έως 1:130, ανάλογα με τις συνθήκες πτήσης του αεροπλάνου. Η αποτελεσματική όμως καύση προϋποθέτει μια αναλογία μάζας 1:15 (καλούμενη στοιχειομετρική αναλογία') πράγμα που σημαίνει πως μόνο ένα μικρό μέρος του αέρα που προωθείται από τον συμπιεστή προς τον θάλαμο καύσης χρειάζεται πραγματικά για την καύση. Η αναλογία αέρα/καυσίμου είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερη από τη στοιχειομετρική, το πηλίκιο δε αυτών των αναλογιών καλείται λόγος ισοδυναμίας φ, που θεωρητικά θα πρέπει να τείνει προς τη μονάδα.

Η ποσότητα αέρα εισέρχεται στον θάλαμο μέσω ενός βραχέος αεραγωγού που διαθέτει πτερύγια στροβιλισμού στις εξόδους του για να μειώνει ακόμα περισσότερο την ταχύτητα του ρευστού. Ο υπόλοιπος αέρας (80% του συνόλου) αποτελεί το

δευτερογενές ρεύμα και διοχετεύεται σε έναν αγωγό που περιβάλλει τον θάλαμο καύσης παίζοντας ρόλο ψυκτικού μέσου για τη μείωση της θερμοκρασίας του καίόμενου αέρα από τους 20000C σε ένα πιο ανεκτό επίπεδο των 12000C έως 14000C. Το καύσιμο ψεκάζεται στο εσωτερικό του θαλάμου υπό μεγάλη πίεση, σχεδόν εξατμισμένο, έτσι ώστε να σχηματίζει έναν ευρύ κώνο και να εξασφαλίζεται η επαρκής μίξη με τον διερχόμενο αέρα. Οι θάλαμοι καύσης των σύγχρονων στροβιλοκινητήρων έχουν έναν βαθμό απόδοσης μεταξύ 90 και 98%, ενώ οι ανεπιθύμητες απώλειες πίεσης του αέρα έχουν περιοριστεί στο 2 έως 7%. Η διαφορά με τον συμπίεστη έγκειται στο ότι η μετάδοση ενέργειας στον θάλαμο καύσης επιτυγχάνεται μέσω χημικής αντίδρασης και η διαδικασία της καύσης οδηγεί σε μια κάθετη αύξηση της θερμοκρασίας ενώ η πίεση παραμένει σχεδόν σταθερή. Είναι ακριβώς το σημείο στο οποίο η ροή αέρα αποκτά τη δυνατότητα να παραγάγει αποτελεσματικά με τη σειρά της μηχανικό έργο.

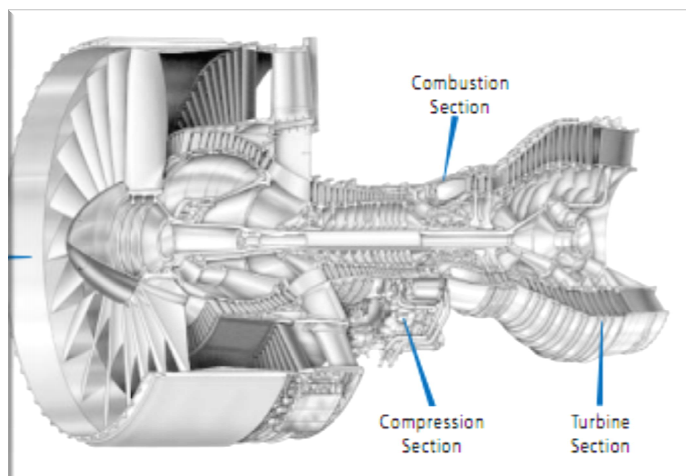
### **3.2.2. Η ΕΛΕΥΣΗ ΤΩΝ TURBOFAN**

Σε ταχύτητες πτήσης της τάξεως των 0,8Mach, οι κινητήρες turboprop και turbojet λειτουργούν με χαμηλή απόδοση ώσης καθώς αυτή η περιοχή ταχυτήτων είναι πολύ υψηλή για τους πρώτους και πολύ χαμηλή για τους δεύτερους. Το κενό άρχισε να καλύπτεται το 1965 όταν η εταιρία General Electric κατασκεύασε τους πρώτους κινητήρες turbofan που διακρίνονταν για τον πολύ καλό βαθμό απόδοσής τους στις λεγόμενες υψηλές υποηχητικές ταχύτητες. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα πολιτικά αεροσκάφη αλλά και για τα στρατιωτικά που ενδιαφέρονται για την μεγάλη ακτίνα δράσης και την οικονομία καυσίμου διατηρώντας την ταχύτητά τους λίγο κάτω από το φράγμα του ήχου που συνεπάγεται ισχυρή οπισθέλκουσα. Για τους λόγους αυτούς ο turbofan είναι σήμερα ο πιο διαδεδομένος τύπος αεροπορικού κινητήρα.

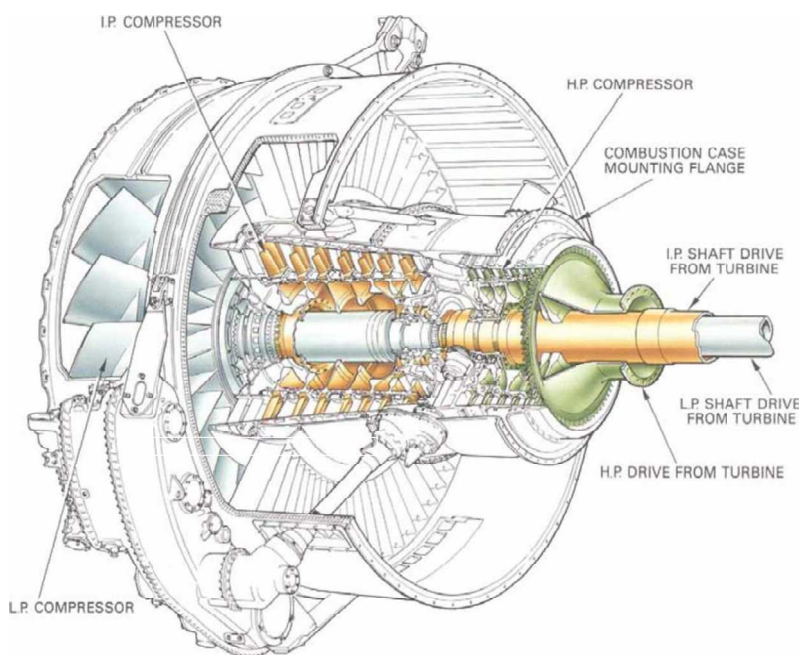
Με αρχή λειτουργίας που μοιάζει λίγο με εκείνη των turboprop, ο στρόβιλος του turbofan είναι σχεδιασμένος για να απορροφά περισσότερη ενέργεια από το θερμό αέριο από ότι θα χρειαζόταν αν επρόκειτο να κινήσει μόνο τον συμπίεστη. Η επιπλέον ισχύς του άξονα χρησιμεύει για να μεταδώσει κίνηση σε έναν ανεμιστήρα (fan) που αποτελεί ουσιαστικά έναν χαμηλής πίεσης συμπίεστη μεγαλύτερης διαμέτρου τοποθετημένο στην αναρρόφηση του κύριου συμπίεστη. Μέρος του αέρα

που εισέρχεται από την εισαγωγή, αφού διέλθει από τον ανεμιστήρα, παρακάμπτει το βασικό συγκρότημα του υπόλοιπου κινητήρα και εκτονώνεται σε ένα ξεχωριστό ακροφύσιο παράγοντας την αποκαλούμενη ' ψυχρή ώση'. Η ποσότητα του αέρα που παρακάμπτει τον θάλαμο καύσης και τον στρόβιλο σε σχέση με την ποσότητα που ακολουθεί την κανονική διαδικασία συμπίεσης - καύσης, ονομάζεται 'λόγος παράκαμψης' (BPR-Bypass Pressure Ratio). Οι turbofan με χαμηλό λόγο παράκαμψης (0,2:1 και 1:1) είναι εξαιρετικά οικονομικοί σε κατανάλωση καυσίμου στις υψηλές υποηχητικές ταχύτητες πτήσης, προσόν που εκτιμάται ιδιαίτερα στις στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά έχουν και κρίσιμες αδυναμίες. Το κυριότερο πρόβλημα που ανέκυψε από τη χρήση τους ήταν η απαράδεκτα υψηλή στάθμη θορύβου, γεγονός που τους απέκλεισε από τη χρήση στην πολιτική αεροπορία. Οι κινητήρες με υψηλό λόγο παράκαμψης (5:1) άρχισαν να κατακτούν την παγκόσμια αεροπορική αγορά από τα τέλη της δεκαετίας του '60 και έπειτα, προωθώντας επιτυχημένους τύπους αεροσκαφών όπως τα Boeing 747, τα Lockheed L-1011 Tristar και τα McDonnell Douglas DC-10.

Το τυπικό χαρακτηριστικό τους είναι ο μεγάλος διαμέτρου μονοβάθμιος ανεμιστήρας μετά τον οποίον ο αέρας χωρίζεται σε εξωτερική (ψυχρή) ροή παράκαμψης και εσωτερική (θερμή) ροή μηχανής. Η επιδίωξη καλύτερου ελέγχου των περιστροφών του συμπιεστή οδήγησε στη δημιουργία συμπιεστών διπλού άξονα (two shaft) (την τελευταία δεκαετία και τριπλού) όπου οι δίσκοι χωρίζονται σε δύο ομάδες περίπου ίδιου αριθμού βαθμίδων και κινούνται από δύο συγκροτήματα στρόβιλου. Με τον τρόπο αυτό τα δύο τμήματα του συμπιεστή μπορούν να λειτουργήσουν με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής (και συχνά αντίρροπα για να εξουδετερώνονται τα ζεύγη ροπών που παράγονται από αυτά) προσδίδοντας μεγάλη ευκαμψία στον κινητήρα. Οι turbofan πολύ υψηλού λόγου παράκαμψης (5:1 έως 12:1) παρέχουν στο αεροπλάνο-φορέα άφθονη ισχύ κατά την απογείωση, κυρίως λόγω της επιτάχυνσης μεγάλης μάζας αέρα που παρακάμπτει τον κύριο κινητήρα και η οποία συμβάλλει κατά 85% στην τελική παραγόμενη ώση!



Εικόνα 3-1: Τομή αεριοστρόβιλου



Εικόνα3-2: Τομή συμπιεστή (Compressor)<sup>[5]</sup>



### **3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. KLAUS HUNECKE, '*Jet Engines*', Second Edition, Airlife Publishing Ltd, 1997.
2. J.R. PALMER, '*The TURBOMATCH Scheme for Gas Turbine Performance Calculations*', SME, User Guide, Thermal Power, Cranfield University, 1983.
3. JANE'S INFO GROUP LTD, '*Jane's Aero-engines*', 1998-1999.
4. JANE'S INFO GROUP LTD, '*Jane's all the World Aircraft*', 1998-1999.
5. ROLLS - ROYCE, '*The Jet Engine*', Fifth Edition, 1996.
6. J.D MATTINGLY, '*Elements of Gas Turbine Propulsion*', McGraw-Hill, 1996.
7. "Aviation Fuels Technical Review", Chevron Products Company, 2000  
([www.chevron.com](http://www.chevron.com))

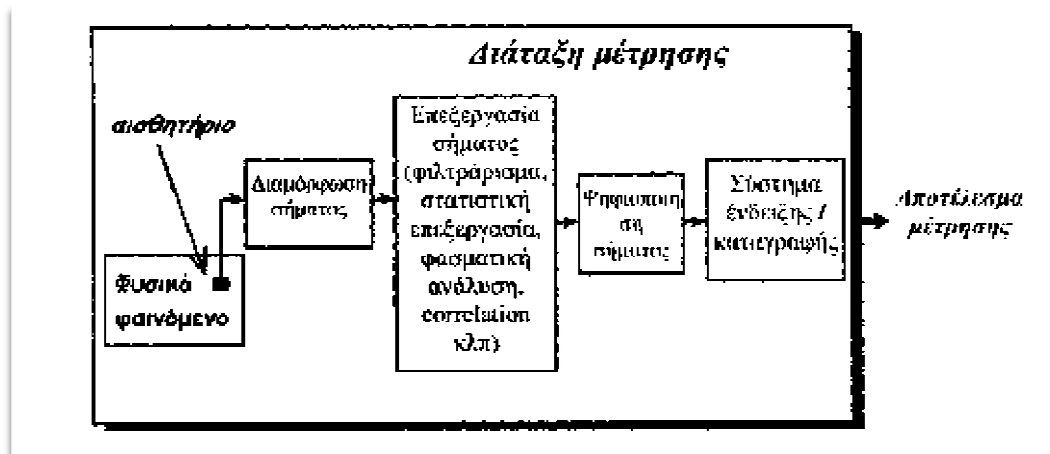
## Κεφάλαιο 4

### Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και Αβεβαιότητα

#### 4.1 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

##### 4.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Τα σφάλματα και η ποιότητα μέτρησης σχετίζονται με τη συμπεριφορά συγκεκριμένων μετρητικών διατάξεων και διαδικασιών, σε συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης.



Σχήμα 4-1: Σχηματική δομή μετρητικών διατάξεων.

Ένα όργανο μέτρησης αποτελεί στην πράξη λειτουργικό σύνολο από ένα ή περισσότερα διακριτά στοιχεία, με σκοπό την παραγωγή μιας ένδειξης, η οποία είναι συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Βασικό στοιχείο του συστήματος είναι ο αισθητήρας που δέχεται την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους και μεταφράζει την επίδραση αυτή σε άμεσα ή έμμεσα αναγνώσιμη πληροφορία. Άλλα συνήθη στοιχεία είναι ο μετατροπέας ή διαμορφωτής σήματος, ο οποίος μετατρέπει την πληροφορία στην έξοδο του αισθητήρα σε μια άλλη πληροφορία πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη, ένα στοιχείο αναλογικής ή ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και ένα στοιχείο απεικόνισης της μέτρησης.

Τα όργανα μέτρησης διακρίνονται σε αναλογικά ή ψηφιακά, παθητικά ή ενεργητικά (ανάλογα με το εάν η παρεχόμενη ένδειξη παράγεται κατευθείαν από το μετρούμενο μέγεθος ή εάν το μετρούμενο μέγεθος διαμορφώνει κατάλληλα ένα άλλο μέγεθος) και μηδενισμού ή απόκλισης (ανάλογα με το εάν το όργανο χρησιμεύει στο να εξισορροπήσει την επίδραση του άγνωστου μετρούμενου μεγέθους με ένα άλλο ομοειδές και γνωστό ή απεικονίζει μια μεταβαλλόμενη ένδειξη).

Στην προσπάθεια για εναρμόνιση σε διεθνές επίπεδο των εννοιών στον τομέα των μετρήσεων χρησιμοποιείται μια τυποποιημένη ορολογία και κωδικοποίηση του χαρακτηρισμού οργάνων, συστημάτων και υλικών μέτρησης. Οι κυριότεροι όροι είναι: όργανο μέτρησης, σύστημα μέτρησης (σύνολο οργάνων συνδεδεμένων μεταξύ τους σε ένα ενιαίο σύνολο), υλικά μέτρησης και υλικά αναφοράς (υλικά για τα οποία οι τιμές μιας ή περισσοτέρων ιδιοτήτων είναι ομογενείς και καλά γνωστές, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση μιας συσκευής, για την αξιολόγηση μιας μεθόδου μέτρησης ή για να αποδοθούν τιμές σε άλλα υλικά), πιστοποιημένο υλικό αναφοράς (υλικό αναφοράς συνοδευόμενο από ένα πιστοποιητικό, μία ή περισσότερες ιδιότητες του οποίου είναι κατάλληλα πιστοποιημένες), πρωτεύον πρότυπο, διεθνές πρότυπο, εθνικό πρότυπο, πρότυπα αναφοράς, πρότυπο μεταφοράς (χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο για συγκρίσεις μεταξύ προτύπων), μετακινούμενο πρότυπο (προορίζεται για μεταφορά από μια τοποθεσία σε μια άλλη), πρότυπο εργασίας [1].

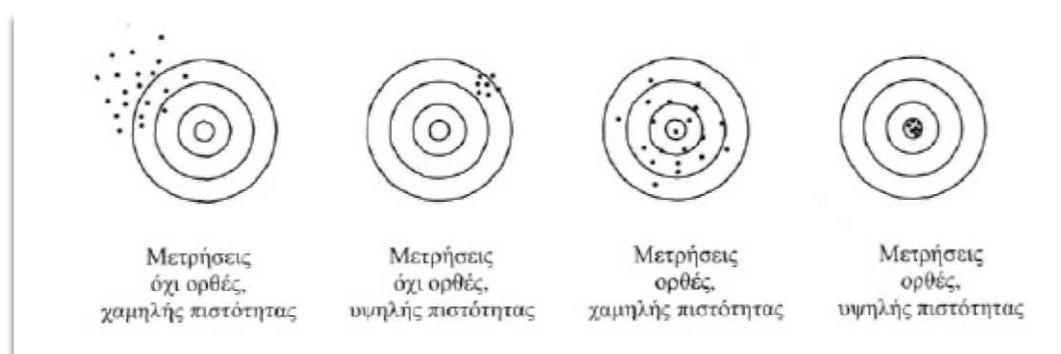
#### 4.1.2 ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Τα στατικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην τεκμηρίωση που συνοδεύει το όργανο και λαμβάνονται υπόψη όταν πρόκειται να κριθεί η καταλληλότητα του για μια συγκεκριμένη χρήση. Ο στατικός χαρακτηρισμός ισχύει μόνο όταν η συσκευή χρησιμοποιείται ικανοποιώντας τις προδιαγραφόμενες τυπικές απαιτήσεις διακρίβωσης. Τα βασικά στατικά χαρακτηριστικά είναι [1]:

■ **Ορθότητα:** Αποτελεί μέτρο του «πόσο ορθά μετράει» το όργανο και ορίζεται ως το μισό του διαστήματος που περιέχει την ένδειξη του οργάνου και μέσα στο οποίο αναμένεται να περιέχεται η ορθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ορθότητα χαρακτηρίζει τη μετρολογική ποιότητα του οργάνου και όχι την ποιότητα μιας συγκεκριμένης μέτρησης.

■ **Ανοχή:** Ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα στην τιμή μιας μέτρησης ή ακόμα τη μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση ενός μεγέθους από μια προδιαγεγραμμένη τιμή.

■ **Πιστότητα:** Αποτελεί χαρακτηριστικό ενός οργάνου ή μιας μεθόδου μέτρησης και όχι του αποτελέσματος της μέτρησης. Η πιστότητα περιγράφει ποιοτικά και όχι ποσοτικά τη διασπορά των ενδείξεων ενός οργάνου ή των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας μέτρησης για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η σχέση πιστότητας και ορθότητας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-2: Πιστότητα και ορθότητα.

■ **Επαναληψιμότητα** (ή πιστότητα επαναληψιμότητας): Περιγράφει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όταν εφαρμόζεται για μια σύντομη χρονική περίοδο ή ίδια τιμή στην είσοδο του οργάνου, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις συνθήκες μέτρησης.

■ **Αναπαραγωγιμότητα** (ή πιστότητα αναπαραγωγιμότητας): Περιγράφει την εγγύτητα των ενδείξεων για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος, αλλά με διαφορετικά όργανα ή με μεταβολές στις συνθήκες μέτρησης.

■ **Διακριτότητα:** Ορίζεται ως η μικρότερη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια ανιχνεύσιμη μεταβολή της ένδειξης ενός οργάνου.

■ **Εύρος:** Αντιπροσωπεύει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους.

■ **Μετατόπιση (ή συστηματικό σφάλμα):** Αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα το οποίο υφίσταται σε όλο το εύρος μέτρησης ενός οργάνου.

■ **Ολίσθηση:** Περιγράφει την επίδραση της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών τόσο σε μια συγκεκριμένη ένδειξη όσο και στην ευαισθησία ενός οργάνου.

■ **Γραμμικότητα:** Αναφέρεται στη γραμμική μεταβολή της εξόδου ενός οργάνου ως συνάρτηση του μετρούμενου μεγέθους.

■ **Ευαισθησία:** Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής των ενδείξεων λόγω μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους προς τη μεταβολή αυτή του μετρούμενου μεγέθους.

■ **Υστέρηση:** Χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των οργάνων, η ένδειξη των οποίων για την ίδια τιμή του μετρούμενου μεγέθους είναι διαφορετική, ανάλογα με το αν η μέτρηση εντάσσεται σε μια αλληλουχία σταδιακά αυξανόμενων ή σταδιακά μειούμενων τιμών.

#### 4.1.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Σε αντίθεση με το όργανο μέτρησης, όπου η διαδικασία μέτρησης είναι προκαθορισμένη, η μέθοδος μέτρησης υπόκειται σε περισσότερο και λιγότερο ελεγμένες παραμέτρους επιρροής που επιδρούν στο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, σημαντική πηγή πληροφορίας για την εκτίμηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων αποτελεί η επικύρωση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Ο όρος επικύρωση μεθόδου αναφέρεται στη διαδικασία αξιολόγησης της καταλληλότητας μιας μεθόδου μέτρησης για το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται, και στην ποσοτική εκτίμηση των επιδόσεων της, ως συνάρτηση των παραγόντων που επιδρούν στην αβεβαιότητα του τελικού αποτελέσματος. Η επικύρωση αποσκοπεί στον προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων στο αποτέλεσμα. Οι κυριότερες από τις παραμέτρους αυτές είναι:

■ Η **επαναληψιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου εξοπλισμού.

■ Η **αναπαραγωγιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου υλικού.

- Η **ενδιάμεση πιστότητα**, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής.
- Η **γραμμικότητα** και το **συστηματικό σφάλμα**.
- Το **όριο ανίχνευσης**, το οποίο προσδιορίζει τα όρια αποτελεσματικότητας της μεθόδου, πέρα από τα οποία η μέθοδος θεωρείται αναποτελεσματική.
- Η **ευστάθεια**, η οποία εκφράζει τις μεταβολές στην απόκριση μιας μεθόδου όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής [1].

## 4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ

### 4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένο, αλλά εξαρτάται από πολλές μη ελεγχόμενες επιδράσεις (ικανότητα του μετρολόγου, επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, ασταθής συμπεριφορά του οργάνου ή του μετρούμενου μεγέθους, κλπ). Επομένως, το επιζητούμενο αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί στοχαστική μεταβλητή και το αποτέλεσμα της ως προερχόμενο από ένα πιθανό σύνολο τυχαία διαμορφούμενο από τις μη ελεγχόμενες επιδράσεις. Η στοχαστική προσέγγιση της μέτρησης θεωρεί ότι, μη μπορώντας να ελέγξουμε τις επιρροές που διαμορφώνουν το εκάστοτε αποτέλεσμα, τα διάφορα αποτελέσματα αποτελούν δυνητικά συμβάντα μιας τυχαίας πειραματικής διαδικασίας [5],[6],[7]. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση εννοιών στατιστικής και πιθανοτήτων, που θα δώσουν απάντηση στο ερώτημα: ποια είναι η πιθανότητα η αποσπασματική πληροφορία που διαθέτουμε (δηλαδή η μέτρηση-παρατήρηση) για μια πιο σύνθετη πραγματικότητα (δηλαδή την αληθή τιμή) να μην αποτελεί σύμπτωση, αλλά να δίνει πληροφορίες για την πραγματικότητα του εξεταζόμενου φαινομένου, ή αλλιώς, με βάση το αποτέλεσμα της μέτρησης και την κατανομή την οποία ακολουθεί το αποτέλεσμα αυτό, ποια η πιθανότητα η αληθής τιμή να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Το πραγματικό ζητούμενο μιας μέτρησης δεν είναι επομένως μια απλή τιμή, αλλά η διαμόρφωση μιας ρεαλιστικής άποψης για τη στοχαστική συμπεριφορά του ίδιου αποτελέσματος, δηλαδή για τη συνάρτηση κατανομής που περιγράφει τη διαδικασία[1].

## 4.2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ

■ **Τυχαία μεταβλητή:** Ο όρος τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιείται για να δηλώσει έναν κανόνα σύμφωνα με τον οποίο ένας πραγματικός αριθμός αντιστοιχεί σε κάθε δυνατό γεγονός ενός πειράματος. Αν ταχτοποιήσουμε τα πιθανά γεγονότα ενός πειράματος με τα σύμβολα  $\lambda_i$  και θεμελιώσουμε αυθαίρετα κάποιο τρόπο σύμφωνα με τον οποίο θα αντιστοιχούμε πραγματικούς αριθμούς  $X(\lambda_i)$  σε κάθε δυνατό γεγονός, ο κανόνας ή η συναρτησιακή σχέση που παριστάνεται με το σύμβολο  $X(\cdot)$  καλείται τυχαία μεταβλητή.

■ **Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας:** Ονομάζουμε συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (σ.κ.π) της τυχαίας μεταβλητής  $X$  την  $F(x) = P(X \leq x)$ ,  $x \in \mathfrak{R}$ .

Ισχύουν:  $0 \leq F(x) \leq 1$ ,  $F(-\infty) = 0$ ,  $F(\infty) = 1$ ,  $F(x_1) \leq F(x_2)$  όταν  $x_1 \leq x_2$ .

■ **Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:** Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π) ορίζεται ως:  $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$

Ισχύουν:

$$f(x) \geq 0 \quad \forall x \quad (\alpha)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (\beta)$$

$$\int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x) \quad (\gamma)$$

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (\delta)$$

■ **Αναμενόμενη τιμή (expectation):**  $E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$  (2.2)

■ **Μεταβλητότητα:** Μια τυχαία μεταβλητή  $X$  έχει μεταβλητότητα (variance):

$$V(x) = E(X - E(x))^2 = E(X^2) - E^2(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(x))^2 f(x) dx$$
 (2.3)

■ **Τοπική απόκλιση (standard deviation):** Παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών και ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας:

$$\sigma = \sqrt{V(x)} \quad (2.4)$$

■ **Συνδυασμένη συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων:** Στην περίπτωση δυο μεταβλητών η πληροφορία σχετικά με τις τιμές τους διατυπώνεται με την παρακάτω σχέση:  $f(x,y) = f(x/y)f(x)$ , όπου  $f(x/y)$  αντιπροσωπεύει την υποθετική κατανομή πιθανοτήτων του  $Y$  με δεδομένη την τιμή του  $X$ . [2]

## 4.2.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ

### 4.2.3.1 ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Το εύρος των εφαρμογών της κανονικής κατανομής εξηγείται από το ότι αντιστοιχεί στο ιδεατό θεωρητικό μοντέλο συμπεριφοράς μιας πραγματικά τυχαίας μεταβλητής. Μία τυχαία μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή με παραμέτρους  $\mu, \sigma$  ( $-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$ ) όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

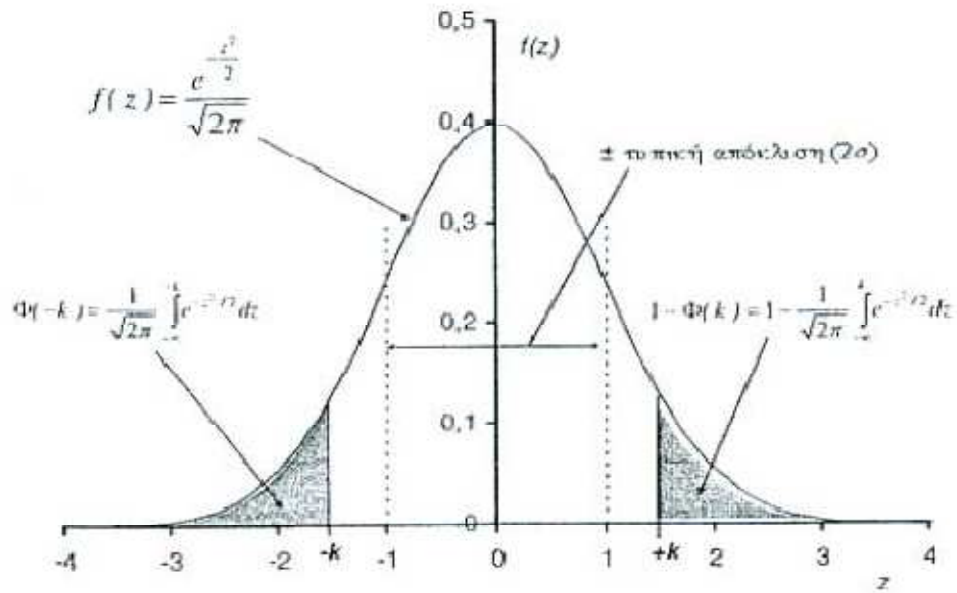
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ειδική περίπτωση όπου  $\mu = 0$  και  $\sigma = 1$ . Με σκοπό την τυποποίηση και τη διευκόλυνση των υπολογισμών, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός  $z = (x - \mu)/\sigma$  και η κατανομή πιθανοτήτων γράφεται:

$f(x) = \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}$ , με μέση τιμή και τυπική απόκλιση του  $z$  ίσες με 0 και 1 αντίστοιχα. Έτσι  $dx = \sigma dz$ , και επομένως έχουμε:

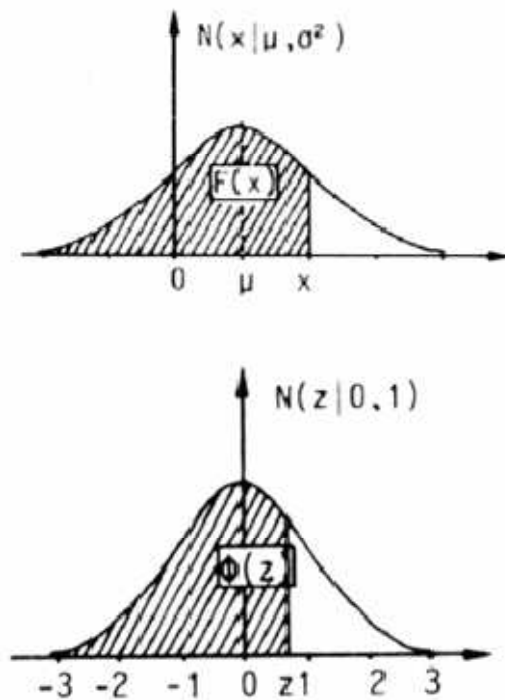
$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right) dx = \int_{-\infty}^{\frac{x_0 - \mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \Phi\left(\frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right)$$

όπου  $\Phi$  η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της τυποποιημένης κανονικής κατανομής  $N(0,1)$ .





Σχήμα 4-3: Τυπική κατανομή  $f(z)$  με  $\mu = 0$  και  $\sigma = 1$ .<sup>[1]</sup>



Σχήμα 4-4: Μετασχηματισμός κανονικής κατανομής με μέση τιμή  $\mu$  και διακύμανση  $\sigma^2$  σε κανονική κατανομή με  $\mu = 0$  και  $\sigma = 1$ .<sup>[1]</sup>

Η πιθανότητα μια τιμή να περιέχεται σε ένα δεδομένο διάστημα  $\Delta X = (x_a, x_b)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p = \int_{x_a}^{x_b} f(x)dx = \int_{z_a}^{z_b} f(z)dz = \Phi(z_b) - \Phi(z_a)$$

#### 4.2.3.2 ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

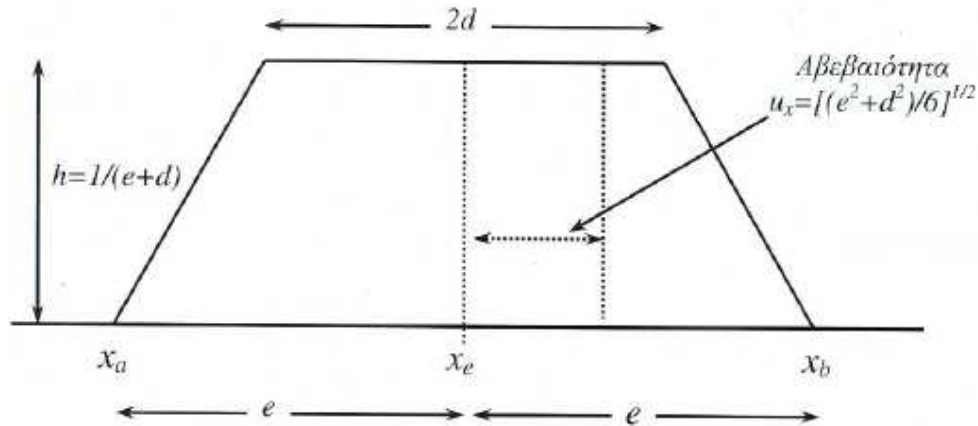
Η τραπεζοειδής κατανομή έχει ως υποπεριπτώσεις την ορθογώνια και την τριγωνική κατανομή. Οι κατανομές αυτές περιγράφουν μεγέθη για τα οποία γνωρίζουμε ότι η καλύτερη αναμενόμενη τιμή  $x_e$  περιέχεται σε ένα διάστημα της μορφής  $(x_a, x_b)$  ή  $x_e \pm e$  με γραμμικά αυξανόμενη πιθανότητα, όσο απομακρυνόμαστε από τα άκρα του διαστήματος αυτού.

Δεδομένης της συμμετρίας, η αναμενόμενη τιμή είναι στο μέσο και προκύπτει από τη σχέση:

$$E(X) = x_e = (x_a + x_b)/2.$$

Η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{V(x)} = \sqrt{E(x)^2} = \sqrt{\frac{e^2 + d^2}{6}}$$



Σχήμα 4-5: Τραπεζοειδής, ορθογώνια και τριγωνική κατανομή<sup>[1]</sup>

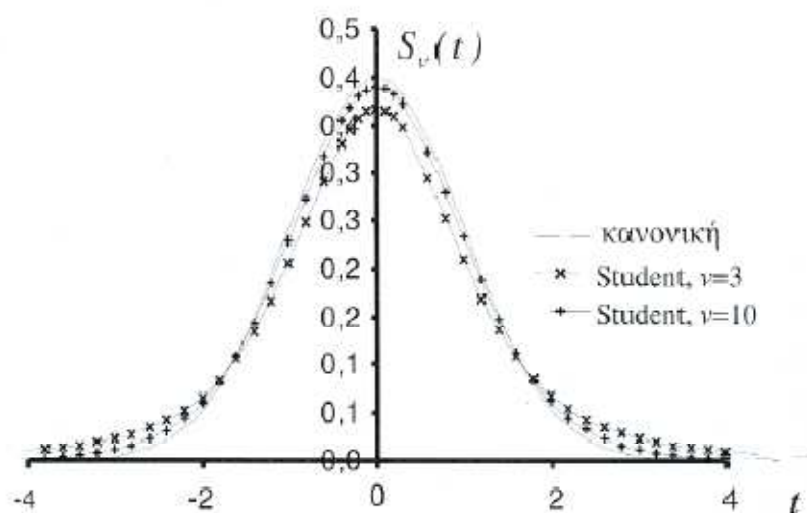
Η ορθογώνια κατανομή ( $d = e$ ) περιγράφει τη στατιστική συμπεριφορά των τιμών ενός μεγέθους, για τις οποίες η μόνη διαθέσιμη πληροφορία συνίσταται στο ότι η αληθής τιμή περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Η τριγωνική κατανομή ( $d = 0$ ) έχει εφαρμογή, μεταξύ άλλων, σε μεγέθη εκφραζόμενα ως συνδυασμός άλλων, οι κατανομές των οποίων είναι ορθογώνιες [1].

#### 4.2.3.3 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ STUDENT (T-DISTRIBUTION)

Η πρακτική σημασία της κατανομής Student έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, σχετικών με τη στοχαστική συμπεριφορά ενός μεγέθους, όταν είναι διαθέσιμες περιορισμένες μόνο πληροφορίες για το μέγεθος αυτό. Η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων γράφεται:

$$S_V(t) = \frac{\Gamma((\nu + 2)/2)}{\Gamma(\nu/2)\sqrt{\pi\nu}} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2}$$

όπου  $\Gamma$  είναι η συνάρτηση gamma και  $\nu$  ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, ο οποίος αποτελεί μέτρο της πληρότητας της διαθέσιμης γνώσης σχετικά με την κατανομή.



Σχήμα 4-6: Κανονική κατανομή Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας.<sup>[1]</sup>

Όταν εξετάζεται ένα δείγμα παρατηρήσεων  $x_i$ ,  $i = 1 \dots N$  ενός μεγέθους  $X$ , η κατανομή του οποίου θεωρείται κανονική με αναμενόμενη τιμή  $\mu$  και μεταβλητότητα  $\sigma^2$ , υπολογίζεται ο μέσος όρος  $\bar{x}$  του δείγματος και η τυπική απόκλιση  $s$  και αποδεικνύεται ότι η μεταβλητή:  $t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{N}} = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma}$ , ακολουθεί κατανομή Student με  $\nu = N-1$  βαθμούς ελευθερίας.

Η κατανομή Student της μεταβλητής αυτής επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας η διαφορά  $\bar{x} - \mu$  να βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια, σχετιζόμενα με την τυπική απόκλιση  $\sigma$  της μέσης τιμής του δείγματος. Η εξάρτηση της κατανομής Student από τους βαθμούς ελευθερίας  $\nu$  μπορεί να ερμηνευθεί ως εξάρτηση της ποιότητας της εκτίμησης του  $\bar{x}$  από το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση αυτή.

Όπως και στην περίπτωση της κανονικής κατανομής, οι τιμές  $k_{p,\nu}$  (που ορίζουν ένα διάστημα  $(-k_{p,\nu}, +k_{p,\nu})$  στο οποίο η πιθανότητα να περιέχεται το  $t$  είναι  $p_{\nu,kt}$ ) για κάθε πιθανότητα  $p_{\nu,kt}$  και για δεδομένο αριθμό βαθμών ελευθερίας  $\nu$  δίνονται σε τυποποιημένους πίνακες της συνάρτησης Student.

#### 4.2.3.4 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ $\chi^2$ (CHI-SQUARE)

Σε αντίθεση με την κανονική κατανομή και την κατανομή Student που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης ή της πιθανότερης τιμής ενός μεγέθους, η κατανομή  $\chi$  χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του μεγέθους αυτού. Πρόκειται για μια μη συμμετρική κατανομή που δίνεται από τη σχέση:

$$f(x) = \frac{1}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} e^{-x/2} x^{v/2-1}, \quad x \geq 0$$

όπου  $v$  είναι οι βαθμοί ελευθερίας της στοχαστικής μεταβλητής

Η κατανομή περιγράφει τη συμπεριφορά του αθροίσματος  $\chi^2$  των τετραγώνων  $v$  τυπικών κανονικών κατανομών, όπου  $v$  εκφράζει τους βαθμούς ελευθερίας του αθροίσματος αυτού :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^v \left( \frac{\chi_i - \mu}{\sigma} \right)^2$$

Η πιθανότερη τιμή της κατανομής είναι ίση με  $v$  και η μεταβλητότητα της ίση με  $2v$ . Εάν έχουμε ένα δείγμα μεγέθους  $N$  και τυπικής απόκλισης  $s$  μιας μεταβλητής, οποία ακολουθεί κανονική κατανομή τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , η στοχαστική μεταβλητή

$$\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$$

ακολουθεί με τη σειρά της κατανομή Chi-square  $v = N-1$  βαθμών ελευθερίας

## 4.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

### 4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η αποδοχή ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της αβεβαιότητας (uncertainty) [1].

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και επομένως το αποτέλεσμα μιας μέτρησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο ( $\pm$ ) μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Παλαιότερα, η χρήση του όρου ακρίβεια προσδιόριζε τη μέγιστη απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την «αληθινή», ως εάν η «αληθινή» τιμή να ήταν απολύτως γνωστή. Εάν αυτό ήταν αληθές, τα προβλήματα της μετρολογίας θα είχαν επιλυθεί. Αντί για αυτό προσπαθούμε να προσεγγίσουμε το «σύννεφο» που περιβάλλει την «αληθινή» τιμή με όρους στατιστικής [3].

Επομένως, σήμερα είναι κοινά αποδεκτό μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι πλήρης εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα: αφενός επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, επιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης μας για μια συγκεκριμένη ποσότητα, αφετέρου δίνεται μια ποσοτική εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της

πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού [1] [8].

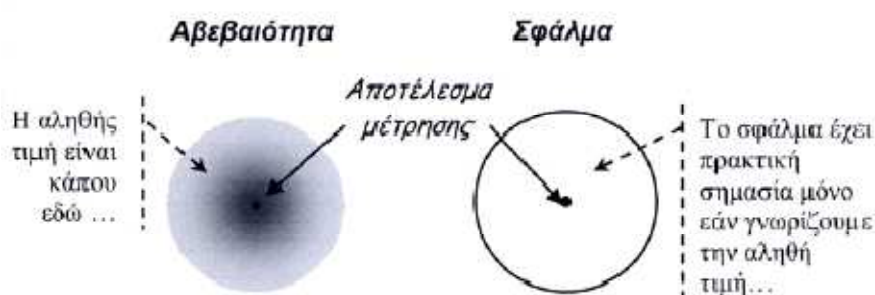
#### **4.3.2 ΑΠΟ ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΗΝ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ**

Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λέξη αληθής χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο «μια» και όχι το οριστικό «η» για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Δηλαδή το σφάλμα είναι εξ' ορισμού μια μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια, που αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους [1].

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία. Τα συστηματικά σφάλματα οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση ή χρήση των οργάνων, στην παράβλεψη ορισμένων φαινομένων, στον μη απόλυτο έλεγχο των συνθηκών του πειράματος, στον παρατηρητή ή σε άλλα εξωτερικά αίτια. Η αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι γνωστή, όχι και όμως και η τιμή τους, ενώ υπακούουν σε φυσικούς νόμους. Τα τυχαία σφάλματα οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή του παρατηρητή, σε φαινόμενα όπου το ίδιο το σύστημα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις, σε εξωτερικό «θόρυβο» ή σε στατιστικές διαδικασίες. Τα τυχαία σφάλματα έχουν άγνωστη αιτία και τιμή, δεν υπακούουν σε φυσικούς νόμους, ενώ μελετώνται στη θεωρία σφαλμάτων [8] [5].

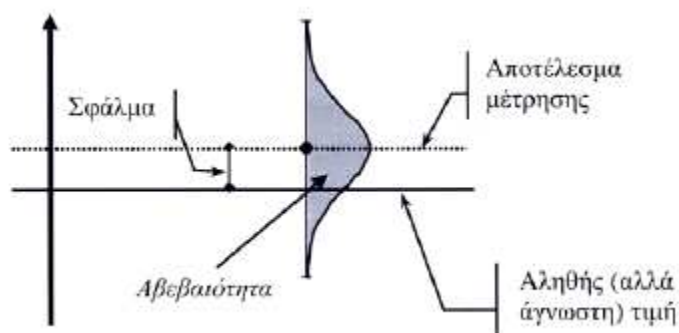
Με τον όρο σφάλμα, λοιπόν, δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία δεν μπορούμε να διορθώσουμε. Ακόμα και αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις δεν μπορεί να εξαλειφθεί, μπορεί όμως να οδηγήσει σε μια κατανομή των μετρούμενων μεγεθών που μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Πρέπει επομένως το σφάλμα να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Τελικά το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερα πρακτική χρησιμότητα, αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία ένδειξη. Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών [1] [3] [9].

Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά - σύμφωνα με τον τις οδηγίες που προτείνονται από την International Committee for Weights and Measures (CIPM) και περιγράφονται στον Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) [4] - ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.



Σχήμα 4-7: Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Σχηματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του σφάλματος στο επίκεντρο της προσοχής έχει τις ρίζες της σε μια ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με μια στοχαστική προσέγγιση.

Η πληροφορία επομένως που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και στη διασπορά των πιθανών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή [1].



Σχήμα 4-8: Σφάλμα και αβεβαιότητα.



Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα αποτέλεσμα μέτρησης μπορεί τελικά να εμπεριέχει μικρό (αλλά άγνωστο) σφάλμα και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως και αντίστροφα, μπορεί να χαρακτηρίζεται από μικρή αβεβαιότητα αλλά στην πραγματικότητα το σφάλμα να είναι μεγάλο. Αυτό που απαιτείται είναι η διατύπωση ενός διαστήματος  $\Delta X = (x_a, x_b)$ , μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική πιθανότητα  $\rho$ , αποκαλούμενη πιθανότητα κάλυψης (coverage probability) ή επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level). Για τις συνήθεις κατανομές πιθανοτήτων η επιλογή ενός διαστήματος  $\Delta X$  εκατέρωθεν της αναμενόμενης τιμής  $x_e$ , οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης, είναι αναγκαία η αύξηση του διαστήματος, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την τυπική αβεβαιότητα με ένα συντελεστή κάλυψης  $k$ , η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της κατανομής  $f(x)$  και από το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Το γινόμενο  $U_x = k u_x$  ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και το τελικό αποτέλεσμα διατυπώνεται ως  $x_e + U_x$  [1] [5] [7].

Πέρα λοιπόν από την πιθανότερη τιμή, απαιτείται η γνώση της τυπικής απόκλισης  $\sigma_x$  των πιθανών τιμών, αλλά και πληροφορίες για το είδος της κατανομής  $f(x)$ , έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα  $u_x = \sigma_x$  και το διάστημα  $(x_e - k u_x, x_e + k u_x)$ , μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή αλλά άγνωστη τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή κάλυψης  $k$ , που εξαρτάται με τη σειρά του από την επιθυμητή πιθανότητα εμπιστοσύνης [6].

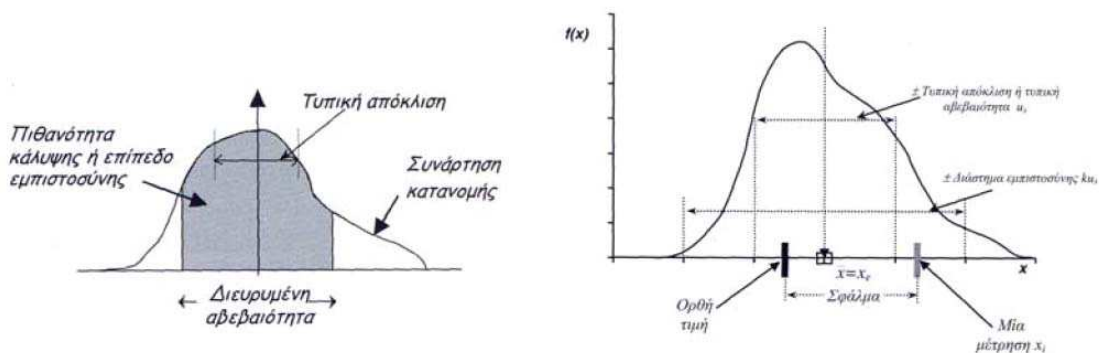
### 4.3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ (ΤΥΠΟΥ Α & ΤΥΠΟΥ Β)

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε τυπική αβεβαιότητα (standard uncertainty), είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty).

Πρέπει να τονιστεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμα της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία

είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος

Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.



Σχήματα 4-10, 4-11: Κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής.

Ο υπολογισμός αβεβαιότητας είναι ένας κατάλογος των πιθανών πηγών λάθους με μια εκτίμηση των ορίων αβεβαιότητάς τους και της κατανομής πιθανότητας τους. Είναι πιθανό μερικές συνεισφορές αβεβαιότητας να μην είναι οι ίδιες σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης και θα πρέπει να ληφθεί μια απόφαση για την κατάλληλη διακοπή της. Ένας απλός υπολογισμός που καλύπτει όλη τη διάρκεια της μέτρησης μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την απαραίτητη. Εντούτοις, αυτό μπορεί να είναι προτιμότερο σε μερικές περιπτώσεις όπου δεν είναι απαραίτητο να δυσκολέψει υπερβολικά ο υπολογισμός και η παρουσίαση της διαδικασίας. Πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στον υπολογισμό της αβεβαιότητας στην περιοχή του ορίου ή των ορίων των προδιαγραφών δοκιμής [3].

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: οι αβεβαιότητες τύπου A, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες τύπου B, που υπολογίζονται με άλλα

μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ «τυχαίων» και «συστηματικών» αβεβαιοτήτων [1], [3],[7],[8].

Οι συνιστώσες τύπου Α προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance).

Οι συνιστώσες τύπου Β, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα (combined uncertainty) προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

#### 4.3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Α

Η αβεβαιότητα τύπου Α χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα  $\chi$  μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  των  $n$  ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας  $X$ , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

Οι αβεβαιότητες τύπου Α υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις [7], [8],[9]:

α)  $U_r$  για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10):

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση:

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}}$$

όπου t: συντελεστής Student (Student's factor)

P: το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level)

$s_r$ : τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων που δίνεται από τη σχέση

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}$$

όπου n: ο αριθμός των μετρήσεων

$X_i$ : οι μετρηθείσες τιμές

$x_m$ : η μέση τιμή των μετρήσεων

n \ P%	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
$\infty$	1,00	1,65	1,96	3,00

Πίνακας 4-1: Τιμές του συντελεστή Student t για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων

β)  $U_r$  μεγάλο αριθμό μετρήσεων ( $n \gg 10$ ):

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις ( $n \gg 10$ ), ο συντελεστής Student μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης k. Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα της μέσης τιμής είναι:

$$U_r = \frac{K s_r}{\sqrt{n}}$$

γ) Χρησιμοποίηση υπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας:

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση  $s_r$ , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη  $s_r$  και η αβεβαιότητα λαμβάνεται ίση με:

$$U_r = \frac{K s_r}{\sqrt{n_2}}$$

#### 4.3.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Β

Αβεβαιότητα τύπου Β (systematic uncertainty) έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από:

- πιστοποιητικά διακρίβωσης,
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις,
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση,
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης,
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [1].

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου Β είναι:

$$U_s = k * S_s = k \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2}$$

όπου  $s_{sa}$  η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και  $s_{sg}$  η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής.

Όταν η διαθέσιμη πληροφορία αφορά μόνο στα όρια  $\pm a$  ανάμεσα στα οποία κυμαίνεται το αναμενόμενο σφάλμα, χωρίς να υπάρχουν ειδικότερες ενδείξεις για την κατανομή ανάμεσα στα όρια αυτά, τότε η υποτιθέμενη κατανομή είναι ομοιόμορφη (ορθογώνια) και η τυπική απόκλιση είναι ίση με:

$$s_a = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Στην περίπτωση που έχουμε  $n$  ανεξάρτητες κατανομές η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} \dots \dots + \frac{a_n^2}{3}}$$

Όταν η αβεβαιότητα δίνεται μαζί με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε πρέπει να υποτεθεί ότι έχουμε κανονική κατανομή. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι της τάξης του 95%, η τιμή του συντελεστή  $k$  είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι:

$$s_{sg} = \frac{U_{95}}{2}$$

Έτσι η εξίσωση 2.17 γίνεται:

$$U_s = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} \dots \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2}$$

Οι περισσότερες συνεισφορές στην αβεβαιότητα αντιπροσωπεύονται επαρκώς από μια συμμετρική κατανομή για το ονομαστικό ή το μετρούμενο αποτέλεσμα, για παράδειγμα η αβεβαιότητα που αποδίδεται σε ένα δέκτη. Όμως, μερικές συνεισφορές δεν είναι συμμετρικές και αυτές αντιμετωπίζονται απλούστερα αν υπολογιστούν χωριστά οι θετικές και οι αρνητικές τιμές της συνολικής αβεβαιότητας. Η απόφαση για το εάν αυτό είναι κατάλληλο θα εξαρτηθεί από τη διαφορά μεταξύ των δύο τιμών και την ανάγκη για αυστηρότητα στην εκτίμηση της αβεβαιότητας. Παράδειγμα ασύμμετρης αβεβαιότητας είναι η εκτίμηση της ασυσχέτιστης αβεβαιότητας (mismatch uncertainty) σε λογαριθμικές μονάδες. Η λύση σε αυτήν την περίπτωση είναι ο υπολογισμός σε απλές γραμμικές μονάδες και η επιλογή της αρνητικής τιμής για τη μετατροπή πίσω σε λογαριθμικές μονάδες ώστε να συμπεριληφθεί η χειρότερη περίπτωση.

Με συνετή επιλογή εξοπλισμού δοκιμής αλλά και μέθοδο μέτρησης, μπορεί να εξασφαλιστεί ότι ο συσχετισμός μεταξύ των ατομικών συνεισφορών αποφεύγεται ή

έστω ελαχιστοποιείται. Εάν υπάρχει δυσμενής συσχετισμός μεταξύ οποιωνδήποτε συνεισφορών που είναι γνωστός ή πιθανός, τότε η απλούστερη προσέγγιση είναι η ομαδοποίηση των συνεισφορών. Αθροίζονται οι πρότυπες αβεβαιότητες αριθμητικά και έπειτα να συμπεριλαμβάνεται η τιμή αυτή στον υπολογισμό σαν μια συνεισφορά. Σε μερικές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα ίδια στοιχεία του εξοπλισμού δοκιμής σε διαφορετικά βήματα στη διαδικασία μέτρησης.[6]

#### 4.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων
2. Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, «Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική», Εκδόσεις Συμεών
3. Άρθρο του Δρ. Α. Λευκόπουλου, Διευθυντή τομέα διακρίβωσης & διευθυντή εργαστηρίου θερμοκρασίας της C3T, «Αβεβαιότητα μετρήσεων»
4. Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1993, International Committee for Weights and Measures, ISO Γενεύη
5. <http://p1iyslab.phvs.uoa.gr> Ιστοσελίδα του εργαστηρίου φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
6. LAB 34, «The Expression of Uncertainty in EMC Testing», Edition 1, United Kingdom Accreditation Service, Αύγουστος 2002
7. M3003 «The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement» , edition 2<sup>nd</sup> January 2007, United Kingdom Accreditation Service (UKAS)
8. S L R Ellison, M Rosslein, A Williams, «Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement», EURACHEM/CITAC Guide 2<sup>nd</sup> edition.
9. JCGM 100:2008 «Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement», Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 1<sup>st</sup> edition September 2008.



## Κεφάλαιο 5

### Πειραματική Διαδικασία

#### 5.1 ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της πειραματικής άσκησης ήταν η εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις της πυκνότητας και του ιξώδους στα αεροπορικά καύσιμα, σύμφωνα με τις πρότυπες μεθόδους ASTM 4052 και ASTM 7042, σύμφωνα με την προσομοίωση ISO GUM. Αναφέρονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν μέχρι τον υπολογισμό της αβεβαιότητας, ώστε να μπορούν να υιοθετηθούν στον υπολογισμό και άλλων καυσίμων.

#### 5.2 ΓΕΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση της αβεβαιότητας απαιτεί τον σχηματισμό αλγεβρικών σχέσεων στις οποίες η μετρούμενη κάθε φορά τιμή  $y_i$  του  $Y$  προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών  $x_1, x_2, \dots, x_n$  των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης

$$Y = M(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος.

Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation) προκύπτει από την ανάπτυξη σε 1ης τάξης σειρά Taylor της συνάρτησης  $M(Y)$  γύρω από το σημείο της μέτρησης  $y_e = M(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ne})$ . (2)

Η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα (standard combined uncertainty) γύρω από την τιμή μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων [14]:

$$Y = M(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx y(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n c_i X_i \quad (3)$$

$$\text{όπου } c_i = \frac{\theta f}{\theta x_i} = \frac{\theta f}{\theta X_i} \Big|_{x_1, x_2, \dots, x_n} \quad (4)$$

Αυτοί οι μερικοί παράγωγοι ονομάζονται συντελεστές ευαισθησίας και εκφράζουν πως η ποσότητα εξόδου  $y$ , να μπορεί να συσχετιστεί με την ποσότητα εισόδου  $x_i$ . Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται ώστε μια ποσότητα εισόδου μπορεί να είναι σε ίδιες μονάδες με την αντίστοιχη ποσότητα εξόδου. Αυτός ο συντελεστής ευαισθησίας αναφέρεται ως  $c_i$  και είναι ένας παράγοντας για μετατροπή από μια μονάδα σε άλλη, όταν η σχέση μεταξύ του  $y$  και του  $x$  είναι γραμμική

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (5)$$

Επειδή όμως στην πράξη η παραγωγή των μερικών παραγώγων μπορεί να είναι δύσκολη και τα αποτελέσματα δε δικαιολογούν πάντα την προσπάθεια που καταβάλλεται, μπορεί αρκετά ικανοποιητικά να χρησιμοποιηθεί μια γραμμική προσέγγιση, όπως το πηλίκο  $\Delta f / \Delta x_i$  όπου το  $\Delta f$  είναι η αλλαγή του  $f$  σαν αποτέλεσμα μιας αλλαγής  $\Delta x_i$  μέσα στο  $x_i$ . Η επιλογή του  $\Delta x_i$  είναι σημαντική και ο οδηγός (GUM) δίνει τις κατευθύνσεις, συστήνοντας το κατάλληλο  $\Delta x_i = u(x_i)$ . Η συνδυασμένη αβεβαιότητα,  $u_c(y)$ , είναι η τετραγωνική ρίζα του συνόλου των τετραγώνων των μεμονωμένων τυπικών αβεβαιοτήτων. Εάν οποιαδήποτε από τις τυπικές αβεβαιοότητες δεν είναι ήδη σε συμφωνία με τη μετρούμενη ποσότητα, τότε μετατρέπονται χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συντελεστή ευαισθησίας,  $c_i$

Έτσι, ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων εκφράζεται ως :

$$u^2(y) = \sum_i c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i < j} c_i c_j u(x_j) u(x_i) r(x_i, x_j) \quad (6)$$

όπου  $u(x_i)$  είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους  $X_i$  και  $u(x_i, x_j)$  είναι η συμμεταβλητότητα μεταξύ  $X_i$  και  $X_j$ .

Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη  $X_1, X_2, \dots, X_N$  θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και η παραπάνω σχέση γράφεται

$$u^2(y) = \sum_i c_i^2 u^2(x_i) = \sum_i u^2(x_i) \quad (7)$$

Για να μετρηθεί η τυπική αβεβαιότητα  $u(x_i)$  χρησιμοποιείται ο τύπος της τυπικής απόκλισης  $s(x_i)$  των  $m$  μετρήσεων

$$u(x_i) = \overline{s(x_i)} = \frac{s(x_i)}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

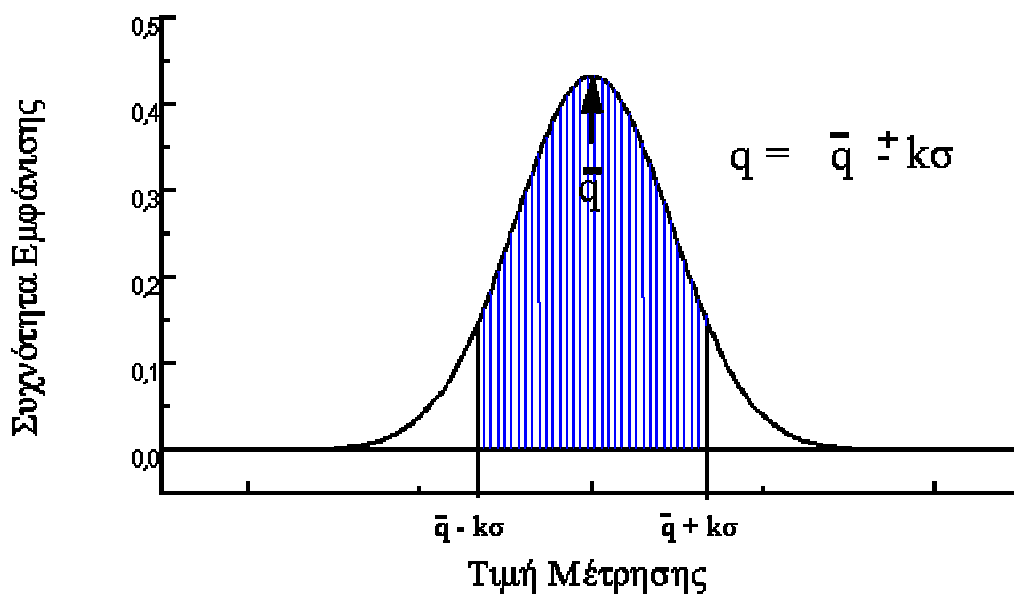
Αν χρησιμοποιούμε κατανομή τύπου A τότε οι τυπικές αβεβαιοότητες βασίζονται στους βαθμούς ελευθερίας  $v = m - 1$

Σε τύπου Β η τυπική αβεβαιότητα όπως είπαμε και παραπάνω (§ 4.3.5) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως στοιχεία κατασκευαστικά, δεδομένα βαθμονόμησης, γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο το επιθυμητό εύρος εμπιστοσύνη να μετατραπεί σε τυπική απόκλιση. Αυτή η μετατροπή απαιτεί πληροφορίες σχετικά με τους βαθμούς ελευθερίας της μεταβλητής, σε αντίθετη περίπτωση θεωρούμε την κατανομή τετραγωνική. Παρακάτω περιγράφονται οι κατανομές πιθανότητας:

- **Κανονική Κατανομή**

Όταν η τιμή έχει προκύψει από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και δηλώνεται η αβεβαιότητα της και το επίπεδο εμπιστοσύνης της (95%) με τύπο :

$$u = U/1.96 \text{ ή συνήθως } u = U/2$$



Σχήμα 5-1: Κανονική κατανομή

- **Τετραγωνική Κατανομή**

Όταν δηλώνονται όρια  $\pm a$  χωρίς να δηλώνεται το επίπεδο εμπιστοσύνης , χωρίς όμως να γνωρίζουμε την κατανομή τότε :

$$u = \frac{\alpha}{\sqrt{3}}$$

Σχήμα 5-2: Τετραγωνική Κατανομή

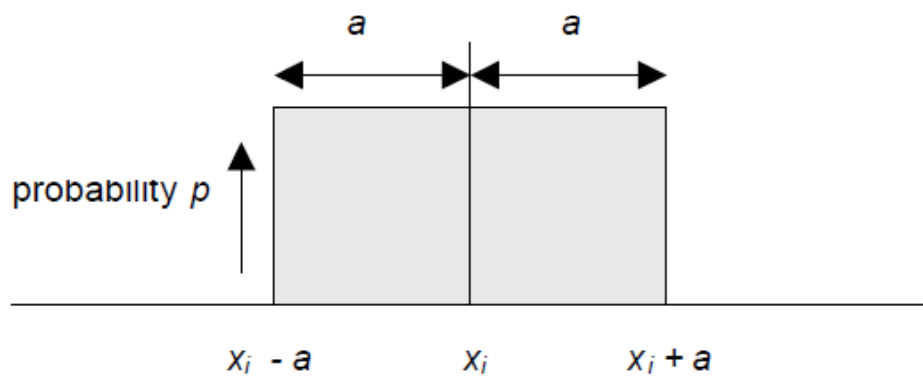
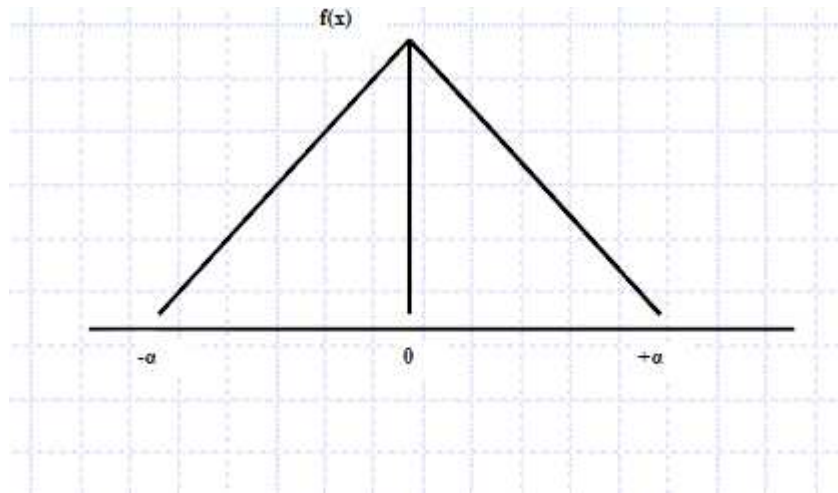


Figure 1

- **Τριγωνική Κατανομή**

Όταν δηλώνονται όρια  $\pm a$  χωρίς να δηλώνεται το επίπεδο εμπιστοσύνης , χωρίς όμως να γνωρίζουμε την κατανομή αλλά θεωρούμε ότι οι πιθανότερες τιμές βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή παρά στα όρια:

$$u = \frac{\alpha}{\sqrt{6}}$$



Σχήμα 5-3: Τριγωνική Κατανομή

Η διευρυμένη αβεβαιότητα,  $U$ , καθορίζει ένα διάστημα για το μετρούμενο αποτέλεσμα που καλύπτει την πραγματική αξία με ένα διευκρινισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης,  $p\%$ . Η διευρυμένη αβεβαιότητα λαμβάνεται με τον πολλαπλασιασμό της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας με έναν παράγοντα κάλυψης,  $k$ , κατά συνέπεια:

$$u = ku(y) \quad (12)$$

Το επίπεδο εμπιστοσύνης που συστήνεται από το UKAS είναι 95% που μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να ληφθεί με  $k = 2$ .

Αν η αβεβαιότητα τύπου A δεν βασίζεται σε πολλές μετρήσεις τότε η διευρυμένη αβεβαιότητα  $U$  αν υπολογιστεί με χρήση συντελεστή κάλυψης  $k=2$  ίσως δεν αντιστοιχεί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% αλλά σε μικρότερο. Δηλαδή, η αβεβαιότητα υπολογίζεται μικρότερη απ' ό,τι θα έπρεπε. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπολογίζεται ένας τροποποιημένος συντελεστής κάλυψης:

$$v_{eff} = \frac{u(y)^4}{\sum_i \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (13)$$

Όπου  $v_i$  αναφέρεται στους βαθμούς ελευθερίας της  $u(x_i)$ , έπειτα από πίνακα με την κατανομές t- student, βρίσκουμε ένα συντελεστή  $k_p$  και πολλαπλασιάζουμε με την τυπική αβεβαιότητα και προκύπτει η διευρυμένη αβεβαιότητα ( $U_p$ ).

## 5.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ

### 5.3.1 Πρότυπη μέθοδος μέτρησης δυναμικού ιξώδους και πυκνότητας με το ιξωδόμετρο της *Stabinger* και υπολογισμός του κινηματικού ιξώδους (*ASTM D 7042*)

Η συγκεκριμένη μέθοδος καθορίζει την διαδικασία για την παράλληλη μέτρηση του δυναμικού ιξώδους  $\eta$  και της πυκνότητας  $\rho$  υγρών προϊόντων πετρελαίου, ακατέργαστων πετρελαίων διαφανών και αδιάφανων.

Το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  μπορεί να προσδιοριστεί με την διαίρεση του δυναμικού ιξώδους  $\eta$  από την πυκνότητα  $\rho$  στην ίδια θερμοκρασία αναφοράς:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την συγκεκριμένη μέθοδο εξαρτώνται από την συμπεριφορά του δείγματος για αυτό είναι προτιμότερο η μέθοδος αυτή να εφαρμόζεται σε υγρά στα οποία οι διατμητικές τάσεις είναι αναλογικές (Νευτωνική συμπεριφορά ροής).

Οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου αναφέρονται σε μονάδες του διεθνούς συστήματος και θα πρέπει να λαμβάνονται ως πρότυπες. Οι αποδεκτές μονάδες μέτρησης της πυκνότητας είναι g/ml ή kg/m<sup>3</sup>.

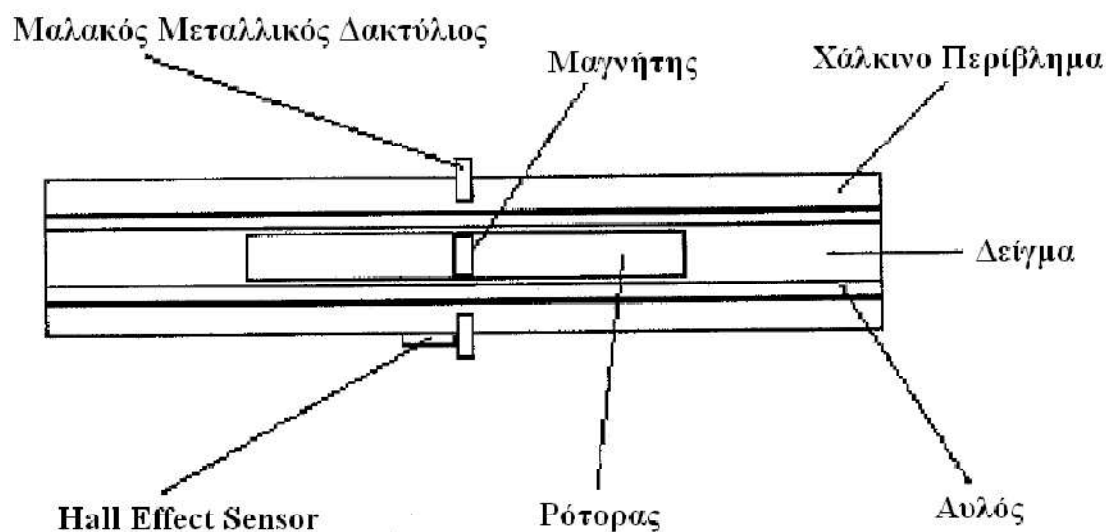
#### Συσκευή (Ιξωδόμετρο *Stabinger SVM 300*)

Το δείγμα εισάγεται στις μετρητικές κυψέλες οι οποίες είναι αυστηρώς ελεγχόμενες και σε γνωστή θερμοκρασία. Οι μετρητικές αυτές κυψέλες αποτελούνται από ένα ζεύγος περιστρεφόμενων ομόκεντρων κυλίνδρων και έναν αιωρούμενο αυλό σχήματος U. Το δυναμικό ιξώδες προσδιορίζεται από την εξισορρόπηση της περιστροφικής ταχύτητας του εσωτερικού κυλίνδρου κάτω από την επίδραση των διατμητικών δυνάμεων του υπό εξέταση δείγματος, η περιστροφή του κυλίνδρου σταματά με τον συνδυασμό εισαγωγής ενός ρεύματος δινών και της επιθυμητής τιμής μέτρησης δυναμικού ιξώδους. Η πυκνότητα προσδιορίζεται με βάση την συχνότητα ταλάντωσης του αυλού σχήματος U σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή ρύθμισης. Το δε κινηματικό ιξώδες υπολογίζεται όπως αναφέραμε από την διαίρεση του δυναμικού ιξώδους με την πυκνότητα. Πιο αναλυτικά :

### Μέτρηση του Ιξώδους:

Το ιξωδόμετρο της Stabinger χρησιμοποιεί ένα περιστροφικό ομοαξονικό κυλινδρικό σύστημα μέτρησης. Ο εξωτερικός κύλινδρος (αυλός) κινείται από ένα κινητήρα με μια σταθερή και γνωστή περιστροφική ταχύτητα. Ο χαμηλού ιξώδους εσωτερικός κύλινδρος (ρότορας) συγκρατείται στον άξονα περιστροφής από τις φυγόκεντρες δυνάμεις του υψηλότερης πυκνότητας δείγματος και ή κατά το διάμηκες θέση του εξασφαλίζεται με την ύπαρξη ενός μαγνήτη και ενός δακτυλίου από μαλακό σίδηρο. Συνεπώς, η όλη διάταξη λειτουργεί χωρίς την χρήση εδράνων τριβής.

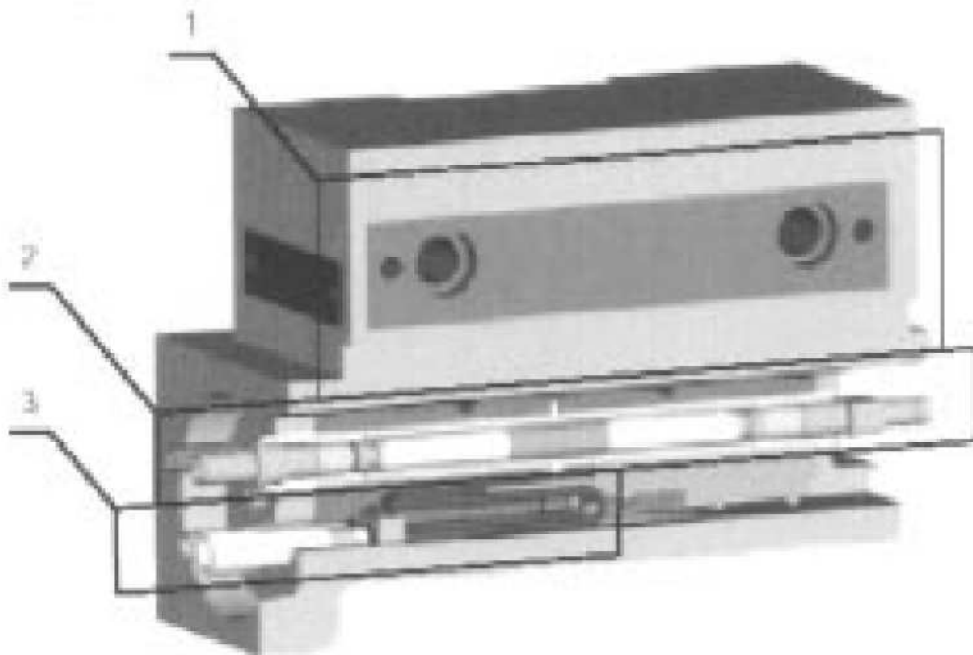
Ο μόνιμος μαγνήτης εισάγει ένα ρεύμα δινών στο χάλκινο περίβλημα. Η περιστροφική ταχύτητα του εσωτερικού κυλίνδρου αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα της εξισορρόπησης ανάμεσα στην ασκούμενη, από τις εσωτερικές δυνάμεις, ροπή και την ροπή του επιβραδυντικού ρεύματος δινών. Αυτή η περιστροφική ταχύτητα μετράται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα (Hall effect Sensor) το οποίο μετράει την συχνότητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 5-4: -Κουπέλι Μέτρησης του Ιξώδους

### Μέτρηση Πυκνότητας:

Ο ψηφιακός αναλυτής πυκνότητας χρησιμοποιεί έναν ταλαντούμενο αυλό σχήματος U στον οποίο εισάγεται το δείγμα και ένα σύστημα ηλεκτρονική διέγερσης και μέτρησης της συχνότητας.



**Σχήμα 5-5: Συνολικό Μπλοκ Κυψελών Μέτρησης Δυναμικού Ιξώδους και Πυκνότητας**

#### *Έλεγχος θερμοκρασίας:*

Ένα χάλκινο μπλοκ περιβάλλει τις μετρητικές κυψέλες κατά τέτοιο τρόπο ώστε και οι δύο κυψέλες να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία. Ένα θερμοηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης (Σχήμα 9 Νο.1) εξασφαλίζει την σταθερότητα θερμοκρασίας του χάλκινου περιβλήματος-μπλόκ στο οποίο περιέχονται οι δύο μετρητικές κυψέλες με απόκλιση από την επιθυμητή τιμή θερμοκρασίας  $\pm 0,005$  °C σε όλο το εύρος των θερμοκρασιών. Η απόκλιση από την επιθυμητή θερμοκρασία δεν μπορεί να ξεπερνά τους  $\pm 0,03$  °C στο εύρος των θερμοκρασιών μεταξύ 15-100 °C. Η απόκλιση εκτός του συγκεκριμένου θερμοκρασιακού εύρους δεν μπορεί να ξεπερνά τους  $\pm 0,05$  °C.

#### **Δειγματοληψία**

Το προς μέτρηση δείγμα λαμβάνεται σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, πριν από την εισαγωγή του στις κυψέλες του ιξωδομέτρου. Στην συνέχεια με την χρήση σύριγγας εμπορικού τύπου της οποίας το υλικό κατασκευής να είναι συμβατό με το δείγμα εισάγουμε το δείγμα μέσω της ειδικά διαμορφωμένης οπής του ιξωδομέτρου στις μετρητικές κυψέλες.



## Διεξαγωγή της Μέτρησης

1) Καθαρισμός των κελιών:

- Εισαγωγή ξηραντικού μέσου (ακετόνη).
- Ενεργοποίηση άντλησης ζεστού ρεύματος αέρα στο κελί από τη συσκευή έως ότου απομακρυνθούν και τα τελευταία ίχνη δείγματος και διαλυτών.
- Η τιμή της πυκνότητας που υποδεικνύει η συσκευή πριν την έναρξη νέας μέτρησης δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 0.0020g/ml.

2) Ρύθμιση της θερμοκρασίας στο επιθυμητό ανάλογα με το προς μέτρηση δείγμα (15 °C για την πυκνότητα και για το ιξώδες).

3) Ανακίνηση του προς μέτρηση δείγματος ώστε να γίνει ομοιογενές.

4) Εισαγωγή τουλάχιστον 3ml δείγματος με σύριγγα η οποία παραμένει στο άνοιγμα εισαγωγής της συσκευής μέχρι το τέλος της μέτρησης.

5) Εκκίνηση της λειτουργίας της συσκευής και καταγραφή των τελικών τιμών που υποδεικνύει η συσκευή.

6) Εισαγωγή 1ml επιπλέον από τη σύριγγα και επανεκκίνηση της μέτρησης. Αν οι δύο τελικές τιμές που υποδεικνύει η συσκευή διαφέρουν περισσότερο από 5% τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

7) Καθαρισμός των κελιών όπως στο πρώτο βήμα.

### 5.3.2 Πρότυπη μέθοδος μέτρησης πυκνότητας και τυπικής πυκνότητας με την χρήση ψηφιακού πυκνόμετρου (ASTM 4052)

Ως πυκνότητα ορίζεται ο λόγος της μάζας δια της μονάδας όγκου σε ειδική θερμοκρασία, ενώ ως σχετική πυκνότητα ορίζεται ο λόγος της πυκνότητας ενός υλικού σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ,προς την πυκνότητα του νερού στην ίδια καθορισμένη θερμοκρασία. Σύμφωνα με την μέθοδο , ένας μικρός όγκος (περίπου 0,7 ml) ενός υγρού δείγματος εισάγεται σε ένα ταλαντευόμενο σωλήνα και η μεταβολή στη συχνότητα ταλάντευσης δημιουργεί την αλλαγή της μάζας του σωλήνα και σε συνδυασμό με τα δεδομένα της βαθμονόμησης ανιχνεύουν την πυκνότητα του δείγματος. Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας χρησιμοποιείται το πυκνόμετρο DMA 48 της ANTON-PAAR .Το πυκνόμετρο αυτό περιλαμβάνει :

- ειδικό ψηφιακό αναλυτή . ο οποίος μετράει την πυκνότητα με ακρίβεια 4<sup>ου</sup> δεκαδικού ψηφίου ,
- έναν γυάλινο υοειδές σωλήνα μέσα στον οποίο εισάγεται το δείγμα
- αυτόματο σύστημα παροχής αέρα για ξήρανση του υοειδούς σωλήνα
- σύστημα για επιπρόσθετη ψύξη με νερό
- σύστημα ηλεκτρονικής ταλάντωσης με μετρητή συχνότητας και
- ένα ειδικό πληκτρολόγιο , από το οποίο γίνονται ρυθμίσεις των συνθηκών μέτρησης όπως η θερμοκρασία κ.λ.π

Επίσης για την μέτρηση της πυκνότητας απαιτούνται επιπλέον : α) λουτρό ικανό να διατηρήσει τη θερμοκρασία κυκλοφορίας του υγρού σταθερή , με απόκλιση  $\pm 0,005^{\circ}$  C από την επιθυμητή τιμή , β) σύριγγες τουλάχιστον όγκου 2 ml με άκρη που θα προσαρμόζει κατάλληλα στην είσοδο του ταλαντευόμενου σωλήνα και γ) θερμοστοιχείο μέσω του οποίου παρακολουθείται η θερμοκρασία του χώρου ανάλυσης κατά 0,1 °C.

## 5.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.4.1 Αποτελέσματα μετρήσεων και προσδιορισμός πηγών αβεβαιοτήτων για την μέτρηση της πυκνότητας

Τα δείγματα που αναλύθηκαν ήταν ένα Jet A1 από την εγκατάσταση της Κω και ένα JP 8 από τις εγκαταστάσεις της Σαντορίνης. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στην μέτρηση της πυκνότητας αντίστοιχα και για τις δύο μεθόδους.

Οι μετρήσεις που πήραμε για το JET A1 :

ΜΕΘΟΔΟΣ D 4052 (kg/m <sup>3</sup> )					
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5	Ημέρα 6
794,7	794,7	794,7	794,7	794,7	794,7
794,7	795,1	794,8	794,8	794,7	794,8
794,7	794,8	794,7	794,7	794,8	794,8
794,8	794,7	794,7		794,7	794,8
794,8	794,7	794,7		794,8	794,8
	794,8	794,7		794,7	

Πίνακας 5-1: Μετρήσεις για JET A1 –Μέθοδος ASTM D 4052

ΜΕΘΟΔΟΣ D 70-42 (kg/m <sup>3</sup> )					
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5	Ημέρα 6
0,7950	0,795	0,7948	0,7941	0,7948	0,7948
0,7947	0,749	0,7947	0,7948	0,7948	0,7948
0,7948	0,795	0,7948	0,7947	0,7948	0,7948
0,7952	0,7947	0,7947	0,7947		0,7949
0,7948	0,7947	0,7947	0,7948		
0,7949	0,7948	0,7948	0,7948		

Πίνακας 5-2: Μετρήσεις για JET A1 –Μέθοδος ASTM D 7042

Οι μετρήσεις που πήραμε για το JP8 :

ΜΕΘΟΔΟΣ D 4052 (kg/L)			
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4
0,8003	0,8003	0,8003	0,8004
0,8003	0,8003	0,8003	0,8001
0,8003	0,8003	0,8004	0,8004
0,8003	0,8003	0,8004	0,8004
0,8003	0,8004		

Πίνακας 5-3: Μετρήσεις JP8 – Μέθοδος ASTM 4052

ΜΕΘΟΔΟΣ D 70-42 (kg/L)				
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5
0,8003	0,8003	0,8004	0,8004	0,8005
0,8003	0,8003	0,8005	0,8005	0,8006
0,8004	0,8004	0,8005	0,8004	0,8005
0,8004	0,8004		0,8005	0,8008
0,8005	0,8005		0,8005	

Πίνακας 5-4: Μετρήσεις JP8 – Μέθοδος ASTM 7042

#### 5.4.1.1 Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση των πηγών αβεβαιότητων

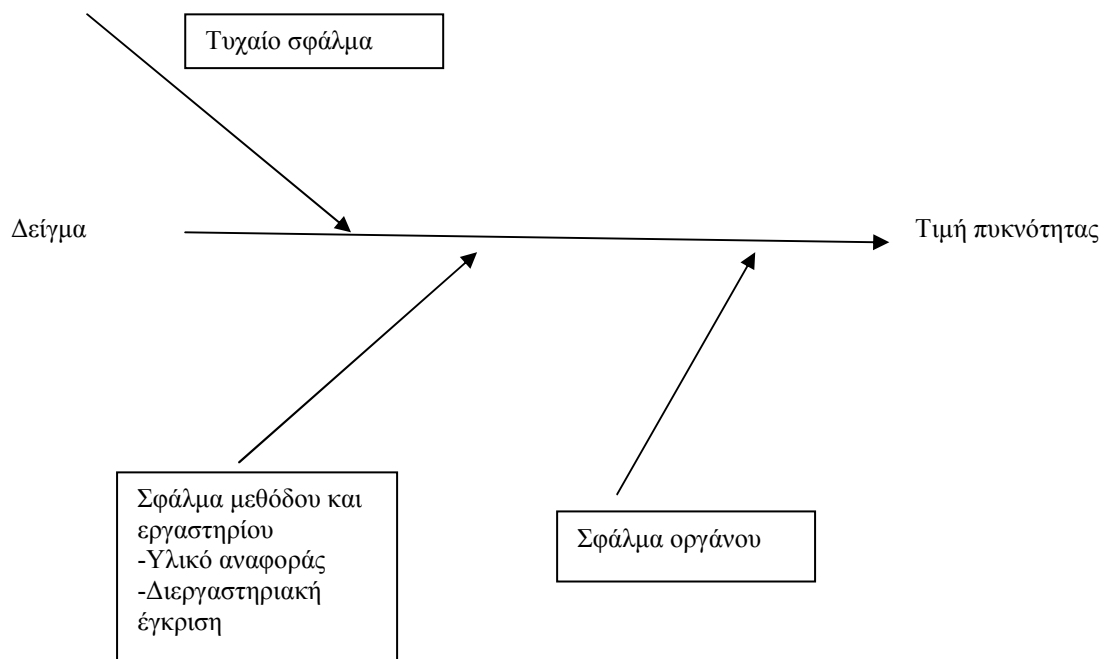
Οι δύο μέθοδοι προσδιορισμού της πυκνότητας είναι ιδιαίτερα αυτοματοποιημένες , επομένως οι συνθήκες μέτρησης είναι σταθερές και δε επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Σε αυτές συγκαταλέγονται οι :

- Δειγματοληψία προ ανάλυσης, δεν εμπεριέχει αβεβαιότητα
- Βάρος ή ο όγκος του δείγματος ,διότι δεν ζυγίζεται κάποιο από τα δείγματα μας αλλά ούτε και έχουμε κάποια μεταβολή όγκου
- Περιβαλλοντικές συνθήκες, έχουν μηδαμινή επιρροή διότι η θερμοκρασία και οι πιέσεις είναι ρυθμισμένες

Έτσι ,οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα μας περιορίζονται στους :

- Το τυχαίο σφάλμα, οφείλεται στον αναλυτή και στις εκάστοτε μετρήσεις
- Το σφάλμα του οργάνου , το οποίο ουσιαστικά μεταφράζεται ως το σφάλμα του θερμομέτρου του οργάνου , ή στο σφάλμα που μπορεί να εμπεριέχουν τα όρια της βαθμονόμησης του ακόμα και στο σφάλμα του αυτόματου αναλυτή
- Το σφάλμα της μεθόδου και του εργαστηρίου από την συμμετοχή του σε διεργαστηριακές συγκρίσεις (bias).

Αυτοί οι παράμετροι απεικονίζονται στο παρακάτω fish-bone διάγραμμα.



Σχήμα 5-1: Διάγραμμα αιτίου και αιτιατού

Η ποσοτικοποίηση των διάφορων πηγών γίνεται με την βοήθεια του προγράμματος Excel και της ANOVA. Παρακάτω αναλύεται το παράδειγμα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας στο Jet A1 με την πρότυπη μέθοδο ASTM D 4052, ακριβώς την ίδια μεθοδολογία ακολουθήσαμε για την εύρεση αυτής και για τις υπόλοιπες μετρήσεις.

1. *Random Error*: Αρχικά βρίσκεται η αβεβαιότητα εξαιτίας τυχαίων συνθηκών (Τυχαίο σφάλμα) και υπολογίζεται ως κατανομή τύπου A τριανταένα ανεξάρτητων μετρήσεων πυκνότητας. Η εκτιμώμενη αβεβαιότητα υπολογίζεται ως ο μέσος όρος αυτών των 30 μετρήσεων, διότι η τιμή  $795,1 \text{ kg/m}^3$  την μέρα 2<sup>η</sup> απορρίφθηκε μέσω του ελέγχου ακραίων τιμών (Κριτήριο Grubbs), ο οποίος είναι ίσος με  $794,752 \text{ kg/m}^3$ . Έπειτα βρίσκουμε την τυπική αβεβαιότητα, η οποία ταυτίζεται με την τυπική απόκλιση των μετρήσεων και για την εύρεση της χρησιμοποιήσαμε την εφαρμογή ANOVA, όπως περιγράφεται παρακάτω.

- ✓ *Κριτήριο Grubbs*: Ένα αποτέλεσμα θεωρείται outlier όταν σύμφωνα με το Grubb's test η τιμή του  $G_i < G_{critical}$  :

$$G_i = \frac{|X_i - \bar{x}|}{s}$$

όπου  $i$  είναι η τιμή max και min αντίστοιχα σε ολόκληρο το σετ μετρήσεων μας

Αν το  $G_i < G_{critical}$  τότε απορρίπτεται η αντίστοιχη τιμή. Το  $G_{critical}$  το βρίσκουμε από τον αντίστοιχο Πίνακα στο Παράρτημα 1 καθώς και στο συγκεκριμένο πεδίο φαίνεται και η πορεία των υπολογισμών που ακολουθήσαμε.

Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5	Ημέρα 6
794,7	794,7	794,7	794,7	794,7	794,7
794,7		794,8	794,8	794,7	794,8
794,7	794,8	794,7	794,7	794,8	794,8
794,8	794,7	794,7		794,7	794,8
794,8	794,7	794,7		794,8	794,8
	794,8	794,7		794,7	

Πίνακας 5-5 : Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων μπορεί να υπολογιστεί με: α) από τον τύπο (8) β) με την χρήση της ANOVA και τέλος πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή ευαισθησίας.

Η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) είναι μέθοδος, με την οποία η μεταβλητότητα που υπάρχει σ' ένα σύνολο δεδομένων διασπάται στις επιμέρους συνιστώσες της με στόχο την κατανόηση της σημαντικότητας των διαφορετικών πηγών προέλευσής της. Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962). Στην πραγματικότητα η ANOVA περιλαμβάνει μία ομάδα στατιστικών μεθόδων καταλλήλων για την ανάλυση δεδομένων που προκύπτουν από πειραματικούς σχεδιασμούς.

Έτσι σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας, όπου βρίσκει ξεχωριστά την διακύμανση για κάθε μέρα και τον μέσο όρο της. Έπειτα χρησιμοποιεί τους ακολουθούμενους τύπους για την εύρεση των στηλών του δεύτερου πίνακα :

Groups	Count	Sum	Average	Variance
Ημέρα 1	5	3973,7	794,74	0,003
Ημέρα 2	5	3973,7	794,74	0,003
Ημέρα 3	6	4768,3	794,7167	0,001667
Ημέρα 4	3	2384,2	794,7333	0,003333
Ημέρα 5	6	4768,4	794,7333	0,002667
Ημέρα 6	5	3973,9	794,78	0,002

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0,011667	5	0,002333	0,928177	0,480158	2,620654
Within Groups	0,060333	24	0,002514			
Total	0,072	29				

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα ANOVA

- $$SS_{\text{within}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_{\square j})^2,$$

υπολογίζει αρχικά το άθροισμα των τετραγωνισμένων αποκλίσεων των παρατηρήσεων από τον μέσο κάθε ομάδας και κατόπιν αθροίζει τα επιμέρους αποτελέσματα για όλες τις ομάδες. Το τελικό αποτέλεσμα λέγεται άθροισμα τετραγώνων μέσα στις ομάδες

- $$SS_{\text{between}} = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{X}_{\square j} - \bar{X}_{\square})^2,$$

υπολογίζει αρχικά για κάθε ομάδα την τετραγωνισμένη απόκλιση του μέσου της ομάδας από τον καθολικό μέσο και κατόπιν πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα με το πλήθος των παρατηρήσεων της ομάδας. Τα επιμέρους αποτελέσματα αθροίζονται για όλες τις ομάδες και το τελικό αποτέλεσμα λέγεται άθροισμα τετραγώνων μεταξύ ομάδων

- Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται  $\sigma^2 = \sigma_w^2 + \sigma_b^2 = 0,050438 \text{ kg/m}^3,$

όπου  $\sigma_w^2 = \sqrt{MS_w}$  και  $\sigma_b^2 = \sqrt{\frac{MS_b - MS_w}{\max(\text{count})}}$

2. *Σφάλμα οργάνου:* Από τον οδηγό χρήσης του οργάνου δίνεται η αβεβαιότητα του οργάνου από τον κατασκευαστή της τάξεως των  $\pm 0,5 \text{ kg/m}^3$ . Θεωρώντας τετραγωνική κατανομή διαιρούμε την διευρυμένη αβεβαιότητα με την  $\sqrt{3}$  και το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την συντελεστή ευαισθησίας  $c=1$ .

3. *Σφάλμα μεθόδου :* Υπολογίζεται από την ASTM και βρίσκεται ίσο με  $\pm 0,6 \text{ kg/m}^3$ . Θεωρώντας τετραγωνική κατανομή διαιρούμε την διευρυμένη αβεβαιότητα με την  $\sqrt{3}$ , το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την συντελεστή ευαισθησίας  $c=1$ .

Ο συνδυασμός των τυπικών αβεβαιοτήτων από τις διάφορες πηγές χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) μας οδηγεί στην συνδυασμένη ισοδύναμη αβεβαιότητα ίση με  $0,454 \text{ kg/m}^3$ .

Τέλος, η διευρυμένη αβεβαιότητα λαμβάνεται με τον πολλαπλασιασμό της συνδυασμένης τυπικής με έναν παράγοντα κάλυψης,  $k=2$  από την εξίσωση (12) :

$$U = 0,907 \text{ kg/m}^3$$

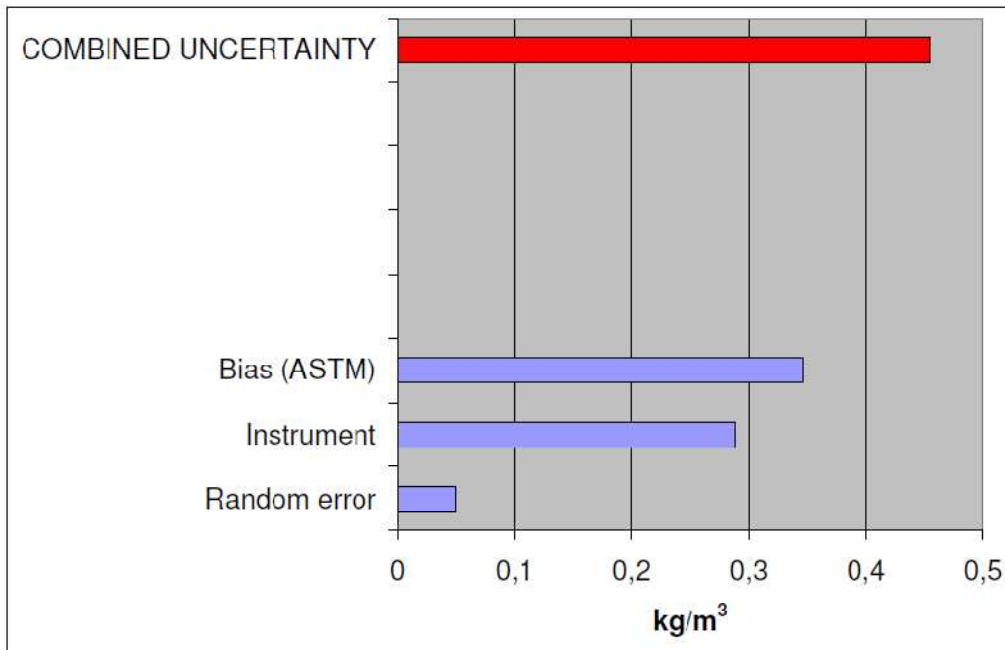
#### **5.4.1.2 Αξιολόγηση-Σχολιασμός Αποτελεσμάτων για Μέτρηση της Πυκνότητας**

Ο πίνακας με τα αποτελέσματα φαίνεται παρακάτω Πίνακας 5-7 ενώ στο διάγραμμα που ακολουθεί Διάγραμμα 5-1 έχουμε την αβεβαιότητα τόσο την συνδυασμένη αλλά και την εισφορά της εκάστοτε πηγής.



QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS
Random error	kg/m <sup>3</sup>	794,752				0,0504379	1	0,050437897 (1%)	
Instrument	kg/m <sup>3</sup>	0,000	0,500	Rectangular	1,732051	0,28867513	1	0,288675135 (40%)	από Manual
Bias (ASTM)	(ppm)	-	0,600	Rectangular	1,732051	0,34641016	1	0,346410162 (58%)	από ASTM
						<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>		0,454 kg/m <sup>3</sup>	
						<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>		0,907 kg/m <sup>3</sup> ή 0,0009 g/ml	

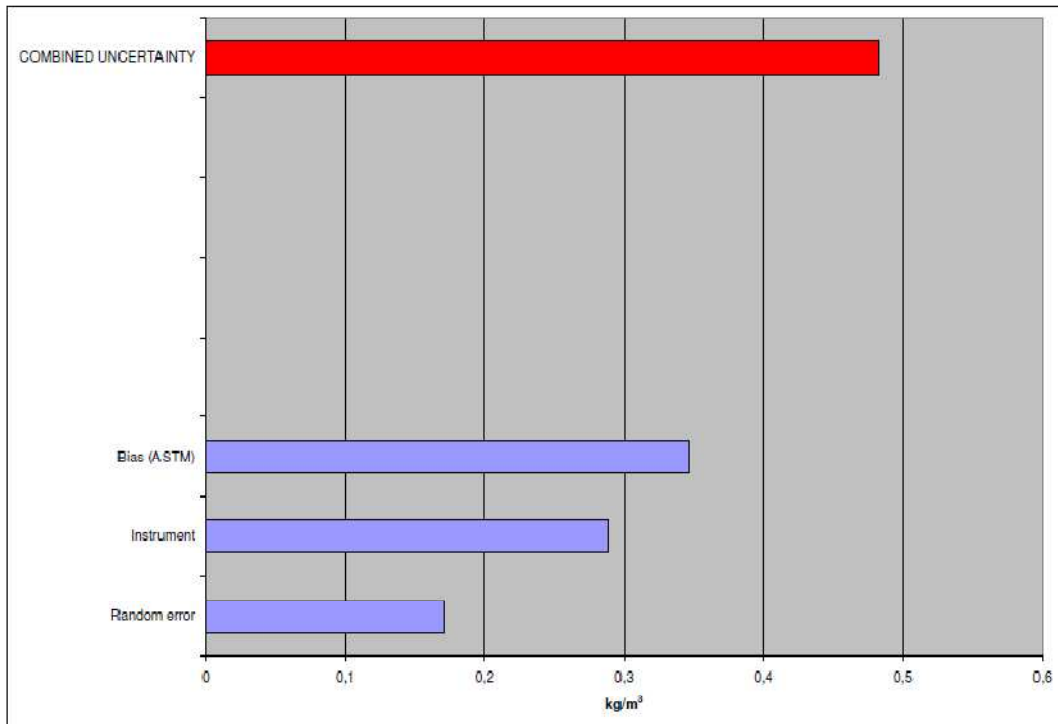
Πίνακας 5-7: Στοιχεία κατανομών πιθανοτήτων των εισερχόμενων μεγεθών του μοντέλου της μέτρησης πυκνότητας JET A1



Διάγραμμα 5-1: Συνδυασμένη αβεβαιότητα της πυκνότητας στην μέθοδο ASTM D 4052 και συνεισφορές αβεβαιοτήτων των πηγών

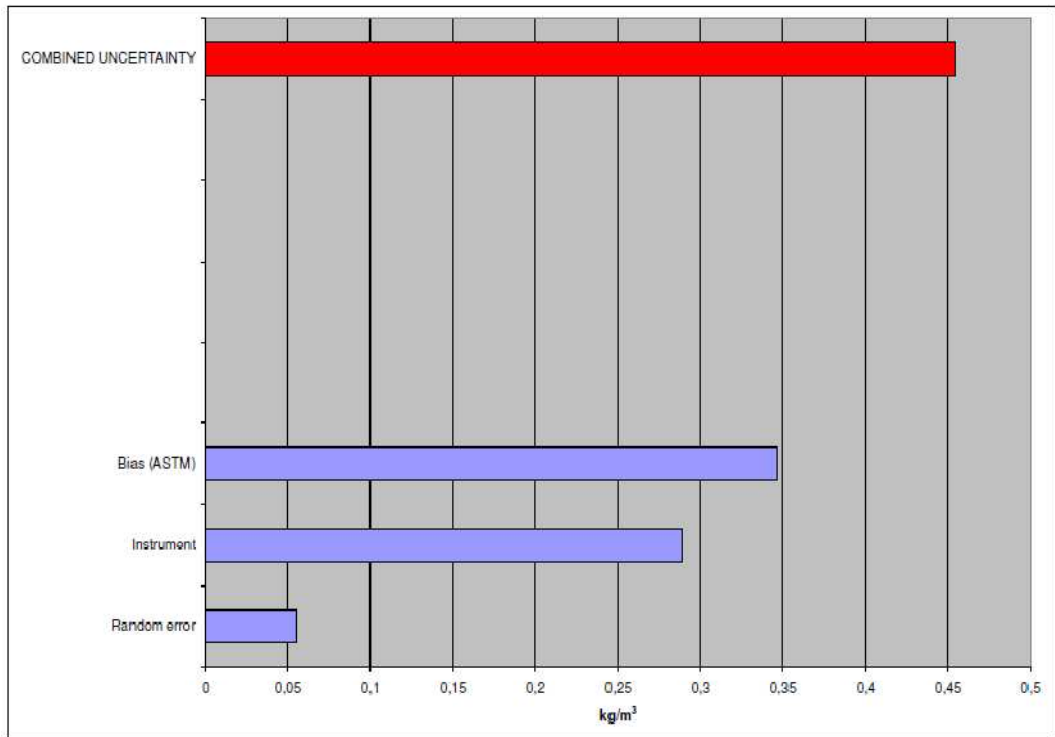
Ακριβώς την ίδια διαδικασία βημάτων, η οποία αναλύθηκε πρωτύτερα στην παράγραφο §5.4.1.1, ακολουθήσαμε και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και στα υπόλοιπες μετρήσεις. Οι αναλυτικοί πίνακες με την εισφορά του κάθε παράγοντα στην συνδυασμένη αβεβαιότητα και τον υπολογισμό τους βρίσκονται στο Παράρτημα 2, τα ακολουθούμενα διαγράμματα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα αυτών των πινάκων. Έτσι, έχουμε:

- Για την μέτρηση της πυκνότητας του Jet A1 με την ASTM D7042



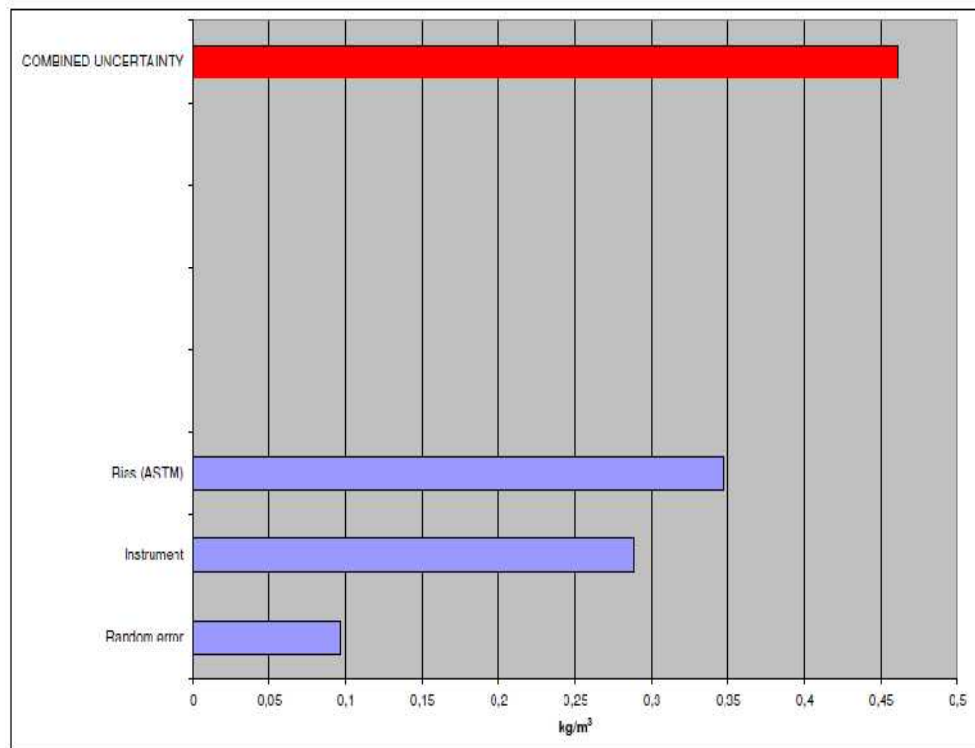
Διάγραμμα 5-2: Συνδυασμένη αβεβαιότητα της πυκνότητας στην μέθοδο ASTM D 7042

- Για την μέτρηση της πυκνότητας του JP8 με την ASTM D4052



Διάγραμμα 5-3: Συνδυασμένη αβεβαιότητα της πυκνότητας στην μέθοδο ASTM D 4052

- Για την μέτρηση της πυκνότητας του JP8 με την ASTM D7042



Διάγραμμα 5-4: Συνδυασμένη αβεβαιότητα της πυκνότητας στην μέθοδο ASTM D 7042

### Σχολιασμός Διαγραμμάτων Πυκνότητας:

Από το σύνολο των διαγραμμάτων (από Διάγραμμα 5-1 έως 5-4) για διαφορετικό τύπου καυσίμου καθώς και με χρήση διαφορετικών μεθόδων παρατηρούμε ότι η συνδυασμένη αβεβαιότητα κυμαίνεται από 0,45 έως 0,46 kg/m<sup>3</sup> και οι συνεισφορές αβεβαιότητας ήταν αποτέλεσμα των παραγόντων α) σφάλματος του οργάνου και β) σφάλματος της μεθόδου. Αφού σε όλα τα διαγράμματα το ποσοστό τους σε σχέση με την συνδυασμένη αβεβαιότητα είναι της τάξης των 40% και 58 % αντίστοιχα. Αυτή την έκβαση την αναμέναμε διότι οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερος αυτοματοποιημένες, συνεπώς δεν επηρεάζονται από την συνεισφορά του τυχαίου σφάλματος, γι' αυτό το λόγο τα ποσοστά του τελευταίου παρατηρούνται κοντά στο 1%.

Όμως το ερώτημα που προκύπτει, εφ' όσον το δείγμα μας έχει μελετηθεί παραπάνω από μία φορές ξεχωριστά σε κάθε μέθοδο, είναι : *Μεταξύ ποιων ορίων δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην αβεβαιότητα που βρίσκουμε ; Κατά πόσο οι δύο μέθοδοι μπορεί να θεωρηθούν ισοδύναμες ;*

Η απάντηση δίνεται από ένα στατιστικό τεστ γνωστό και ως t-Test .Χρησιμοποιώντας το πακέτο από την εφαρμογή του excel, προκύπτει ο πίνακας στο Παράρτημα 4 ,σύμφωνα με τον οποίο ελέγχουμε την απόλυτη τιμή του t να είναι μικρότερη του  $t_{crit}$  ,2 tails (t κρίσιμο, δίπλευρο: στην έκδοση των 2007 ). Επίσης, με τον τύπο του excel TDIST=(  $t_{crit}$  , βαθμοί ελευθερίας, δείγματα) βρίσκουμε αν τα δείγματα μας αναφέρονται σε κατανομή 95% ,όπως έχουμε θεωρήσει αρχικά στην επίλυση για την εύρεση των αβεβαιοτήτων ,διαφορετικά η διαφορά των δύο μεθόδων θεωρείται σημαντική ανάλογα με την κατανομή που καλύπτει .

- Για τις μεθόδους ASTM D 7042 και ASTM D 4052 για JET A1 το αποτέλεσμα αυτού του τεστ έδειξε :  $|-1,2328| < 2,000298$  και επίσης TDIST= 0,05% , άρα οι μέθοδοι θεωρούνται ισοδύναμες.
- Για το JP8 αντίστοιχα: έχουμε  $|-2,37| > 2,03$  , TDIST= 0.02% άρα δεν είναι ισοδύναμες, και τα όρια αντοχής τους είναι διαφορετικά, όχι όμως ιδιαίτερα υψηλή η διαφορά τους.

Τέλος , άλλη μια απορία που γεννιέται είναι :Κατά πόσον οι μετρήσεις ενός τύπου καυσίμου με τον ίδιο τρόπο ανάλυσης μπορούν να θεωρηθούν ακριβείς ; Αυτό το ελέγχουμε συγκρίνοντας τις διακυμάνσεις τους χρησιμοποιώντας το στατιστικό εργαλείο F- statistic test ή αντικαθιστώντας στον τύπο

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} , \text{ όπου } s_1 > s_2$$

Τα αποτελέσματα μας (Παράρτημα 5) τόσο από την αντικατάσταση στον τύπο όσο και από την χρήση του προγράμματος μας παρουσιάζουν ότι οι μετρήσεις μας δεν θεωρούνται ακριβείς.

Επομένως , καταλήγουμε να απορρίψουμε ή καλύτερα να θέσουμε ως εναλλακτική μία εξ αυτών, συγκεκριμένα την ASTM D 7042 εξαιτίας του μεγαλύτερου σχετικού σφάλματος της από την 4052.

#### 5.4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων και προσδιορισμός πηγών αβεβαιοτήτων για την μέτρηση του ιξώδους

Τα δείγματα που μελετήθηκαν είναι ακριβώς τα ίδια με αυτά της πυκνότητας δηλαδή το JET A1 της Κω και το JP8 της Σαντορίνης . Παρακάτω ακολουθούν οι μετρήσεις μας :

Μέθοδος ASTM D 7042 (mm <sup>2</sup> /s) για JET A1					
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5	Ημέρα 6
1,6621	1,6611	1,6626	1,6372	1,6591	1,6476
1,6454	1,6362	1,6549	1,6392	1,636	1,6461
1,6484	1,6407	1,6388	1,637	1,6372	1,6422
1,6624	1,6328	1,642	1,6387		1,6401
1,6427	1,6369	1,6388	1,6378		
1,6422	1,6362	1,6422	1,6398		

Πίνακας 5-8 : Μετρήσεις ιξώδους JET A1

Μέθοδος ASTM D 7042 (mm <sup>2</sup> /s) για JP8				
Ημέρα 1	Ημέρα 2	Ημέρα 3	Ημέρα 4	Ημέρα 5
1,7925	1,7974	1,7955	1,7993	1,7992
1,7903	1,7972	1,7959	1,7986	1,8096
1,7921	1,7977	1,7976	1,7991	1,8017
1,7921	17993		1,8007	1,8335
1,8013	1,807		1,8067	

Πίνακας 5-9 : Μετρήσεις ιξώδους JP8

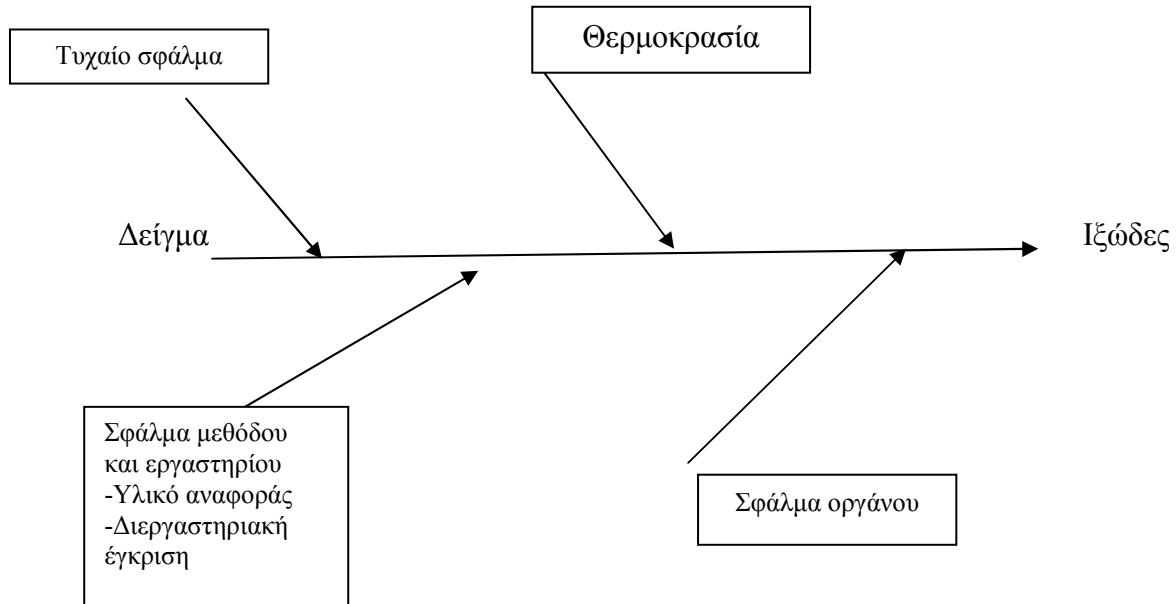
#### 5.4.2.2 Προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση των πηγών αβεβαιότητων

Ακριβώς όπως και με την πυκνότητα, έτσι και για το ιξώδες ισχύει ότι η μέθοδος ASTM D 7042 είναι αυτοματοποιημένη, επομένως οι πηγές αβεβαιότητας περιορίζονται. Σε αντίθεση με το παράδειγμα της πυκνότητας, δεν έχουμε δεδομένα για την αβεβαιότητα της μεθόδου (bias) έτσι το πήραμε από διεργαστηριακά τεστ στα οποία συμμετείχε το εργαστήριο. Επίσης άλλη μία διαφορά με το παράδειγμα της πυκνότητας είναι το σφάλμα της θερμοκρασίας, αφού ανάλογα με την θερμοκρασία που ρυθμίζουμε βλέπουμε μια μικρή μεταβολή στο ιξώδες. Επομένως οι πηγές αβεβαιότητας για την μέτρηση του ιξώδους :

1. Το τυχαίο σφάλμα, οφείλεται στον αναλυτή και στις εκάστοτε μετρήσεις
2. Το σφάλμα του οργάνου, στο σφάλμα αυτό μπορεί να εμπεριέχονται τα όρια της βαθμονόμησης του ακόμα και το σφάλμα του αυτόματου αναλυτή
3. Το σφάλμα της μεθόδου και του εργαστηρίου από την συμμετοχή του σε διεργαστηριακές συγκρίσεις (bias).
4. Το σφάλμα της θερμοκρασίας.



Αυτοί οι παράμετροι απεικονίζονται στο παρακάτω fish-bone διάγραμμα.



Σχήμα 5-2: Σχήμα αιτίου και αιτιατού

Η ποσοτικοποίηση των διάφορων πηγών γίνεται και εδώ με την βοήθεια του προγράμματος Excel και της ANOVA. Παρακάτω αναλύεται το παράδειγμα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας στο Jet A1, ακριβώς την ίδια μεθοδολογία ακολουθήσαμε για την εύρεση αυτής και για το JP8 .

1. *Random Error*: Αρχικά βρίσκεται η αβεβαιότητα εξαιτίας τυχαίων συνθηκών (Τυχαίο σφάλμα) και υπολογίζεται ως κατανομή τύπου A εικοσιτεσσέρων ανεξάρτητων μετρήσεων ιξώδους. Η τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται ,ως η τυπική απόκλιση αυτών των μετρήσεων, αφού προηγήθηκε ο έλεγχος με το κριτήριο Grubbs (Παράρτημα 1), και είναι ίση με  $0,03 \text{ mm}^2/\text{s}$ . (Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων μπορεί να υπολογιστεί με: α) από τον τύπο (8) β) με την χρήση της ANOVA και τέλος πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή ευαισθησίας, στο τυχαίο σφάλμα ίσο με ένα).

2. *Σφάλμα οργάνου*: Από τον οδηγό χρήσης του οργάνου δίνεται η αβεβαιότητα του από τον κατασκευαστή της τάξεως των  $\pm 0,0035 \text{ mm}^2/\text{s}$  .Θεωρώντας τετραγωνική

κατανομή διαιρούμε την διευρυμένη αβεβαιότητα με την  $\sqrt{3}$ , το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την συντελεστή ευαισθησίας  $c=1$ .

3. *Σφάλμα μεθόδου* : Η μέθοδος δεν ανέφερε κάποια συγκεκριμένη πληροφορία σχετικά με το σφάλμα της, έτσι χρησιμοποιήσαμε στοιχεία δύο συναπτών ετών συμμετοχής του εργαστηρίου σε διεργαστηριακά και με την βοήθεια του τύπου:

$$RMS_{BIAS} = \sqrt{\frac{\sum(\text{bias})^2}{n}}$$

υπολογίστηκε ίσο με  $0,067 \text{ mm}^2/\text{s}$ . Θεωρώντας τετραγωνική κατανομή διαιρούμε την διευρυμένη αβεβαιότητα με την  $\sqrt{3}$ , το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με την συντελεστή ευαισθησίας  $c=1$ .

4. *Σφάλμα Θερμοκρασίας* : Από την διακρίβωση του οργάνου βρέθηκε ότι το σφάλμα της θερμοκρασίας ισοδυναμεί με  $\pm 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ . Θεωρώντας ότι η κατανομή είναι κανονική διαιρούμε την προηγούμενη τιμή με 2 και βρίσκουμε την τυπική αβεβαιότητα, αυτή πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή ευαισθησίας, Ο συντελεστής αυτός βρέθηκε λαμβάνοντας την τιμή του κινητικού ιξώδους σε δύο θερμοκρασίες που διέφεραν κατά  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ . Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της μετρούμενης τιμής είναι ίση με  $0,0036 \text{ mm}^2/\text{s}$ , άρα ο συντελεστής είναι το αποτέλεσμα αυτής της διαίρεσης δηλαδή  $0,0072 \text{ mm}^2/\text{s C}$ .

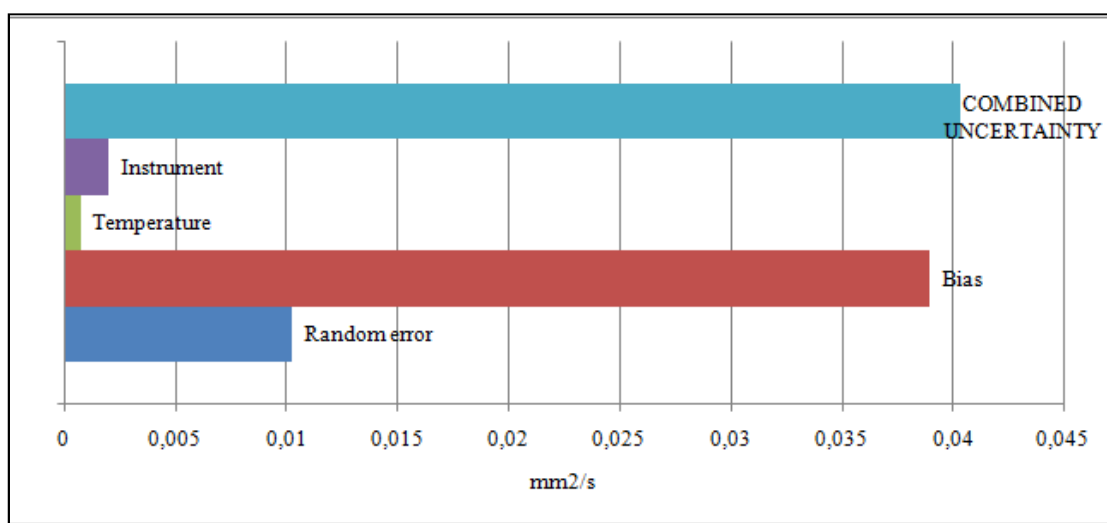
Ο συνδυασμός των τυπικών αβεβαιοτήτων από τις διάφορες πηγές χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) μας οδηγεί στην συνδυασμένη ισοδύναμη αβεβαιότητα ίση με  $0,0402 \text{ mm}^2/\text{s}$

Τέλος, η διευρυμένη αβεβαιότητα λαμβάνεται με τον πολλαπλασιασμό της συνδυασμένης τυπικής με έναν παράγοντα κάλυψης,  $k=2$  από την εξίσωση (12) :

$$U = 0,0806 \text{ mm}^2/\text{s}$$

### 5.4.2.2 Αξιολόγηση-Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Μέτρησης του Κινηματικού Ιξώδους

Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 5-10 ,ενώ στο Διάγραμμα 5-5 που ακολουθεί έχουμε την αβεβαιότητα την συνδυασμένη αλλά και την εισφορά της εκάστοτε πηγής

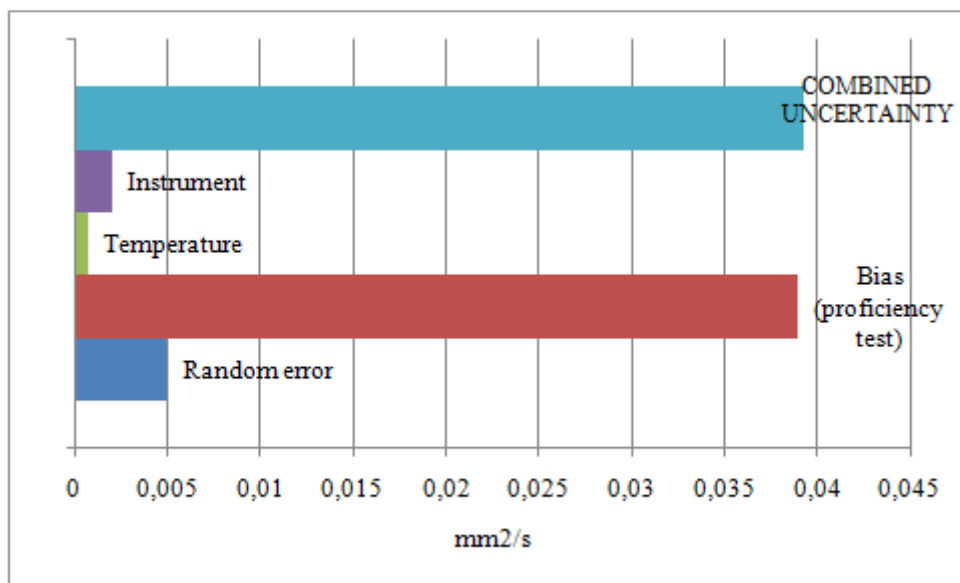


Διάγραμμα 5-5: Συνδυασμένη αβεβαιότητα για την μέτρηση του κινηματικού ιξώδους στο δείγμα JET A1 με χρήση της μεθόδου ASTM D 7042 και συνεισφορές αβεβαιοτήτων των πηγών

QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS
Random error	mm <sup>2</sup> /s	0	1,6			0,01	1	0,01 (6,43%)	
Bias (proficiency test)	mm <sup>2</sup> /s	-	0,067	Rectangular	1,73205	0,03891666	1	0,038916657 (93,29%)	
Temperature	C	15	0,02	normal	2	0,01	0,072000	0,0007 (0,03%)	$\frac{\theta v}{\theta T} = \frac{\Delta v}{\Delta T}$
Instrument	mm <sup>2</sup> /s		0,00350	Rectangular	1,73205	0,00202073	1	0,002020726 (0,25%)	
<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>								0,04029 mm <sup>2</sup> /s	
<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>								0,0806 mm <sup>2</sup> /s	

Πίνακας 5-10: Στοιχεία κατανομών πιθανοτήτων των εισερχόμενων μεγεθών του μοντέλου της μέτρησης ιξώδους για το JET A1

Ακριβώς την ίδια διαδικασία βημάτων, η οποία αναλύθηκε πρωτύτερα στην παράγραφο §5.4.2.1, ακολουθήσαμε και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στην μέτρηση του JP8. Οι αναλυτικοί πίνακες με την εισφορά του κάθε παράγοντα στην συνδυασμένη αβεβαιότητα και τον υπολογισμό τους βρίσκονται στο Παράρτημα 3 , το ακολουθούμενο διάγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτών των πινάκων. Έτσι , έχουμε:



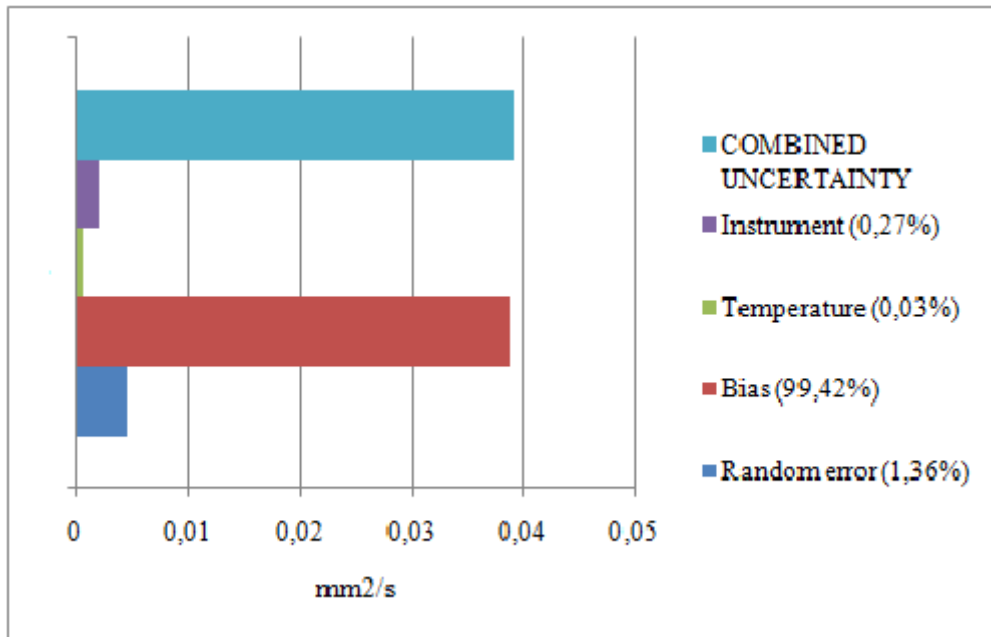
Διάγραμμα 5-6: Συνδυασμένη αβεβαιότητα για την μέτρηση του ιξώδους του JP8

### Σχολιασμός Διαγραμμάτων:

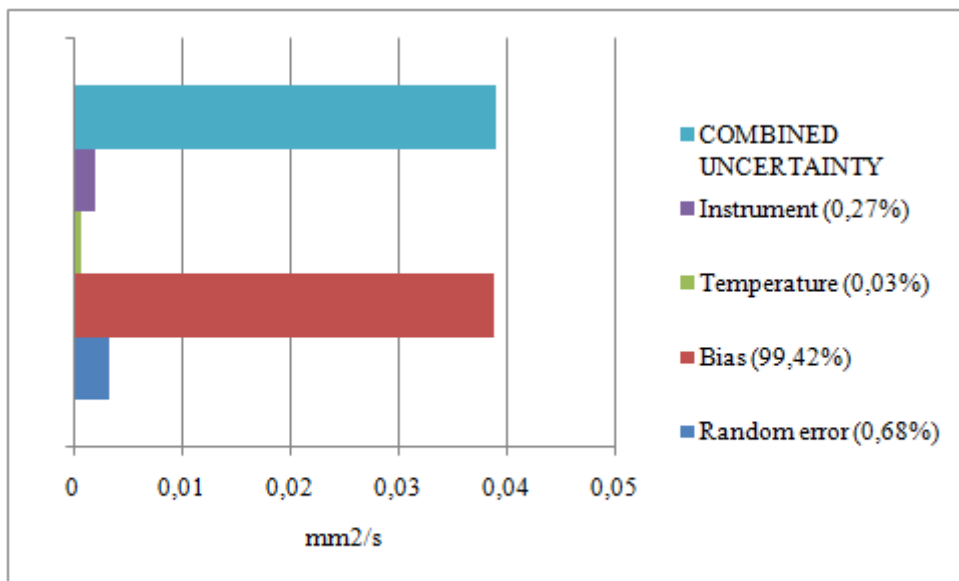
Για την αβεβαιότητα στο ιξώδες δεν μπορούμε να εξάγουμε ένα συμπέρασμα πιο γενικό για το όργανο και το καύσιμο , αφού μελετήθηκαν μόνο δύο διαφορετικά καύσιμα. Επομένως, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιες θεωρήσεις που αντιστοιχούν μόνο στο συγκεκριμένο όργανο στο χημείο της Ε.Κ.Ο. Αρχικά διακρίνουμε ότι το σφάλμα της μεθόδου πάλι και σε αυτή την μέτρηση έχει πρωταρχικό ρόλο στην συνεισφορά των αβεβαιοτήτων με ποσοστά της τάξης των 93,29% και 98,11 % για το JET A1 και JP8 αντίστοιχα..Ο λόγος προφανώς είναι ότι η μέθοδος είναι πλέον αυτοματοποιημένη καθώς και οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι περιορισμένοι.

Όμως βλέπουμε ότι για το Jet A1 το τυχαίο σφάλμα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το JP8 , παρόλο που το σφάλμα του χειριστή δεν επηρεάζει ουσιαστικά την μέτρηση. Αν προσέξουμε και τα διαγράμματα της πυκνότητας , πάλι θα συνειδητοποιήσουμε ότι το JET A1 έχει μεγαλύτερο τυχαίο σφάλμα στην ASTM D 7042 από το JP8. Αυτή η παρατήρηση ίσως να οφείλεται σε εντελώς τυχαίους παράγοντες ή ακόμα και στην ίδια την ανάλυση από τον συγκεκριμένο αναλυτή. Μια πιθανή βελτίωση θα ήταν να αυξήσουμε τον αριθμό των επαναλήψεων της κάθε μέτρησης. Πρακτικά αυτό φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

Αν η κάθε μέτρηση γινόταν 5 φορές επαναληπτικά τότε η τυπική αβεβαιότητα του τυχαίου σφάλματος διαιρείται με τη ρίζα του πέντε ,με αποτέλεσμα το ποσοστό του σφάλματος των 6,43% γίνεται αυτομάτως 1,36%. Αν γινόταν 10 φορές επανάληψη συνεχίζει να μειώνεται στο 0,68% :



Διάγραμμα 5-7: Συνδυασμένη αβεβαιότητα για την μέτρηση του ιξώδους του JET A1 επαναλαμβάνοντας την κάθε μέτρηση 5 φορές.



Διάγραμμα 5-8: Συνδυασμένη αβεβαιότητα για την μέτρηση του ιξώδους του JET A1 επαναλαμβάνοντας την κάθε μέτρηση 10 φορές.

Τέλος, για να ελέγξουμε την ακρίβεια του οργάνου στην μέτρηση του ιξώδους θα χρησιμοποιήσουμε το F-test λαμβάνοντας υπόψη ότι η Μεταβλητή 1 είναι το JET A1

και η Μεταβλητή 2 το JP8. Αυτό το ελέγχουμε συγκρίνοντας τις διακυμάνσεις τους χρησιμοποιώντας το στατιστικό εργαλείο F- statistic test. Αντικαθιστώντας στον τύπο ή χρησιμοποιώντας την εφαρμογή του excel.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \text{ όπου } s_1 > s_2$$

Έλεγχος F των διακυμάνσεων δύο δειγμάτων		
	<i>Μεταβλητή 1</i>	<i>Μεταβλητή 2</i>
Μέσος	1,644012903	1,79861
Διακύμανση	7,98618E-05	2,46E-05
Μέγεθος δείγματος	31	21
βαθμοί ελευθερίας	30	20
F	3,241289689	
P(F<=f) μονόπλευρη	0,003979127	
F κρίσιμο, μονόπλευρο	2,039085904	

Πίνακας 5-11: Έλεγχος F-Test για τα δείγματα μας ώστε να μετρηθεί η ακρίβεια του οργάνου στην μέτρηση του ιξώδους

Όπως διακρίνουμε το όργανο δεν έχει μεγάλη ακρίβεια , και δικαιολογημένα λοιπόν στο εργαστήριο της Ε.Κ.Ο δεν το χρησιμοποιούσαν για την μέτρηση του κινηματικού ιξώδους.



## **Κεφάλαιο 6**

### **Συμπεράσματα και Προτάσεις Εναλλακτικής Μελέτης**

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε εκτίμηση της αβεβαιότητας της μέτρησης της πυκνότητας και του ιξώδους των αεροπορικών καυσίμων σύμφωνα με τις πρότυπες μεθόδους ASTM D 4052 και ASTM D 7042. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας έγινε με την εφαρμογή της μεθοδολογίας ISO GUM (ISO / IEC Guide 98-3:2008 ). Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις παραπάνω μετρήσεις, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

Αρχικά , για την μέτρηση της πυκνότητας το ποσοστό αβεβαιότητας που μετρήθηκε για την εκάστοτε μέθοδο και για κάθε καύσιμο ξεχωριστά είναι :

- Για το JET A1
  - ASTM D 4052:  $794.752 \pm 0.907 \text{ kg/m}^3$  (ή το 0.11 % της εκτιμώμενης )
  - ASTM D 7042 :  $794.794 \pm 0.965 \text{ kg/m}^3$  (ή το 0.12 % της εκτιμώμενης)
- Για το JP 8
  - ASTM D 4052:  $800.335 \pm 0.909 \text{ kg/m}^3$  (ή το 0.11 % της εκτιμώμενης )
  - ASTM D 7042 :  $800.414 \pm 0.922 \text{ kg/m}^3$  (ή το 0.11% της εκτιμώμενης)

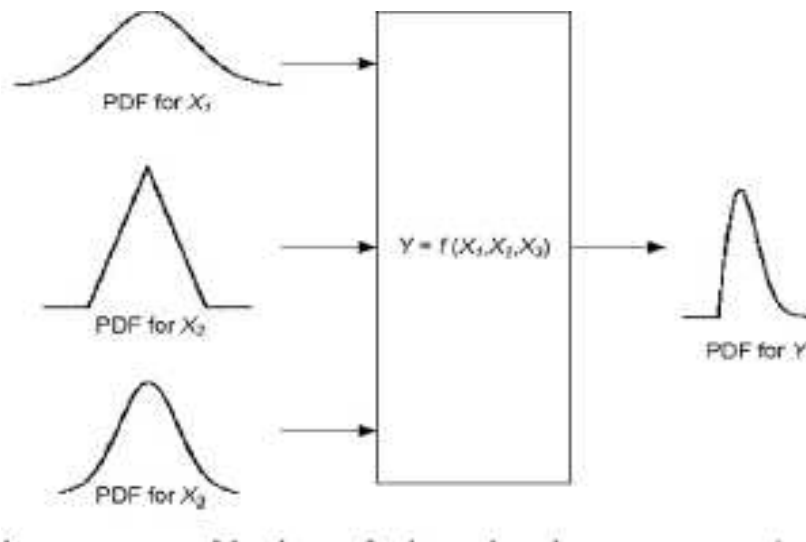
Επομένως, από τα χαμηλά ποσοστά συμπεραίνουμε ότι οι μέθοδοι είναι ιδιαίτερος ακριβείς. Το πόρισμα αυτό επιβεβαιώνεται καθώς τα αποτελέσματα της αναπαραγωγισιμότητας και της επαναληψιμότητας καλύπτουν τις προδιαγραφές των μεθόδων. (Παραρτημα 6)

Επίσης έγινε έλεγχος σχετικά με την ισοδυναμία των δύο μεθόδων , από τον οποίο καταλήξαμε οι δύο μέθοδοι δεν θεωρούνται ταυτόσημες , διότι τόσο από το F-test όσο και από το T-test βρήκαμε διαφορές στις διακυμάνσεις τους , άρα είναι προτιμότερη η μέθοδος με το μικρότερο τυχαίο σφάλμα , δηλαδή η ASTM D 4052, αφού έτσι περιορίζονται τα όρια της αβεβαιότητας.

Σχετικά με το κινηματικό ιξώδες , οι μετρήσεις μας ήταν περιορισμένες , γι' αυτό το λόγο δεν μπορούμε να εξάγουμε ένα γενικότερο συμπέρασμα σχετικά με την μέθοδο. Μια εκτίμηση που μπορεί να γίνει για το συγκεκριμένο όργανο είναι ότι τα αποτελέσματα μας από την μέτρηση δεν χαρακτηρίζονται από ακρίβεια. Αυτό καταδεικνύεται τόσο από τον έλεγχο με το στατιστικό εργαλείο F-test όσο και από τον υπολογισμό της ολικής αβεβαιότητας. Πιο συγκεκριμένα

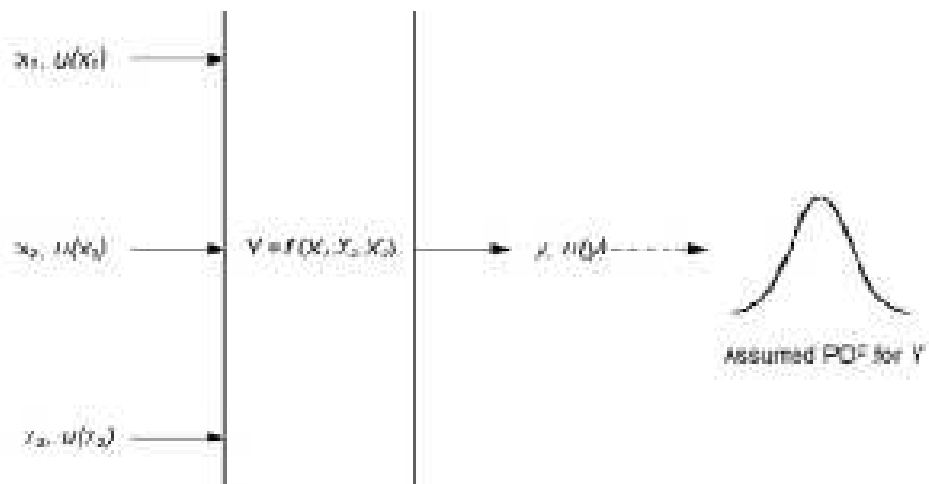
- Για το JET A1 μετρήθηκε :  $1,6 \pm 0,0806 \text{ mm}^2/\text{s}$  (ή 4,9% της συνολικά εκτιμώμενης αβεβαιότητας)
- Για το JP8 :  $1,8 \pm 0,0786 \text{ mm}^2/\text{s}$  (ή 4,36% της συνολικά εκτιμώμενης αβεβαιότητας ).

Μια εναλλακτική μέθοδος της ευρέως καθιερωμένης μεθοδολογίας κατά GUM είναι η Monte Carlo. Το πλεονέκτημα της χρήσης της έγκειται στο γεγονός ότι η εκτίμηση της αβεβαιότητας δεν υπόκειται στους περιορισμούς της προσέγγισης κατά GUM , όπως η ισχύς του θεωρήματος Κεντρικού Ορίου ( η τυπική απόκλιση του πληθυσμού των μέσων τιμών είναι πάντα ίση με την τυπική απόκλιση του μητρικού πληθυσμού σ διαιρεμένη με το μέγεθος του δείγματος) ενώ δεν απαιτεί πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς (π.χ μερικές παράγωγοι). Στην προσέγγιση GUM εκτιμάται η τυπική αβεβαιότητα του εξερχόμενου μεγέθους Y και γίνεται η υπόθεση πως ακολουθεί κανονική κατανομή, αντίθετα στην προσέγγιση Monte Carlo απευθείας προσδιορίζεται η κατανομή του εξερχόμενου μεγέθους χωρίς κάποια παραδοχή. Τέλος η τεχνική Monte Carlo βασίζεται στην διάδοση κατανομών πιθανοτήτων ενώ η GUM αβεβαιοτήτων



α)

β)



Σχήμα 6-1: α) Διάδοση κατανομών πιθανότητας 3 ανεξάρτητων μεταβλητών (Monte Carlo )  
 β) Διάδοση κατανομών αβεβαιότητας 3 ανεξάρτητων μεταβλητών (GUM)

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## Παράρτημα 1

- Πυκνότητα για JET A1 ASTM D 4052

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>OUTLIER TEST (Grubbs)</b>								
2									
3		Data				=MIN(b4:C13)			
4	794,7	794,7	794,7	minimum	794,7				
5	794,8	794,7	795,1	maximum	795,1				
6	794,7	794,7	794,8						
7	794,7	794,8	794,7						
8	794,7	794,8	794,7						
9	794,7		794,8						
10	794,7	794,7	794,7						
11	794,8	794,8	794,7						
12	794,7	794,8	794,8						
13		794,8	794,7						
14		794,8	794,8						
15			794,7						
16	Average	794,7516							
17	Stdev	0,081121							
18	n	31							
19									
20	G'min	-9001,7							
21	G'max	4,29465							
22									
23	G'crit	2,923571							
24									
25									
26									
27	=((B18-1)/SQRT(B18))*SQRT((TINV(0,05/B18;B18-2))^2/(B18-2+TINV(0,05/B18;B18-2)^2))								
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									

$$G_{critical} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n)}^{*n-2}}{n-2 + t_{(0,05/n)}^{*n-2}}}$$

- Πυκνότητα για JET A1 ASTM D 7042

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>OUTLIER TEST (Grubbs)</b>								
2									
3		Data				=MIN(a4:C15)			
4	795,00	795,00	794,8	minimum	794,1				
5	794,7	794,9	794,7	maximum	795,2				
6	794,8	795,00	794,8						
7	795,2	794,7	794,7			=MAX(A4:C15)			
8	794,8	794,7	794,7						
9	794,9	794,8	794,8						
10	794,1	794,8	794,8						
11	794,8	794,8	794,8						
12	794,7	794,8	794,8						
13	794,7		794,9						
14	794,8								
15	794,8								
16	Average	794,7935				=(B16-MIN(A4:C15))/B17			
17	Stdev	0,171144							
18	n	27							
19									
20	G'min	790,4171							
21	G'max	-4639,35							
22									
23	G'crit	2,858923							
24									
25									
26									
27	=((B18-1)/SQRT(B18))*SQRT((TINV(0,05/B18;B18-2))^2/(B18-2+TINV(0,05/B18;B18-2)^2))								
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									

**Minimum number is outlier**

$$G_{\text{critical}} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n), n-2}^2}{n-2 + t_{(0,05/n), n-2}^2}}$$

- Ποικνότητα για JP8 ASTM D 4052

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>OUTLIER TEST (Grubbs)</b>								
2									
3		Data							
4	800,3	800,3							
5	800,3	800,3			800,3				
6	800,3	800,3			800,4				
7	800,3	800,3							
8	800,3	800,4							
9	800,4	800,3							
10	800,4	800,3							
11	800,4	800,4							
12		800,4							
13									
14									
15									
16	Average	800,3353							
17	Stdev	0,049259							
18	n	17							
19									
20	G'min	-15446,4							
21	G'max	1,313579							
22									
23	G'crit	2,619964							
24									
25									
26									
27	$=((B18-1)/SQRT(B18))*SQRT((TINV(0,05/B18;B18-2))^2/(B18-2+TINV(0,05/B18;B18-2)^2))$								
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									

$$G_{critical} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n)}^2 n-2}{n-2 + t_{(0,05/n)}^2 n-2}}$$

- Πυκνότητα για JP8 ASTM D 7042

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	OUTLIER TEST (Grubbs)									
2										
3		Data				=MIN(a4:C15)				
4	795,00	795,00	794,8	minimum	794,1					
5	794,7	794,9	794,7	maximum	795,2					
6	794,8	795,00	794,8							
7	795,2	794,7	794,7							
8	794,8	794,7	794,7							
9	794,9	794,8	794,8							
10	794,1	794,8	794,8							
11	794,8	794,8	794,8							
12	794,7	794,8	794,8							
13	794,7		794,9							
14	794,8									
15	794,8									
16	Average	794,7935								
17	Stdev	0,171144								
18	n	27								
19										
20	G'min	790,4171								
21	G'max	-4639,35								
22										
23	G'crit	2,858923								
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										

$$G_{\text{critical}} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n)}^2 n-2}{n-2 + t_{(0,05/n)}^2 n-2}}$$

- Ιξώδες για JP8 ASTM D 7042

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>OUTLIER TEST (Grubbs)</b>								
2									
3		Data							
4	1,7925	1,7974	1,7955	minimum	1,7903				
5	1,7903	1,7972	1,7959	maximum	17993				
6	1,7921	1,7977	1,7976						
7	1,7921	17993							
8	1,8013	1,807							
9	1,7993	1,7992							
10	1,7986	1,8096							
11	1,7991	1,8017							
12	1,8007	1,8335							
13	1,8067								
14									
15									
16	Average	819,582							
17	Stdev	3835,737							
18	n	22							
19									
20	G'min	0,213203							
21	G'max	4,477215							
22									
23	G'crit	2,757735							
24									
25									
26									
27	$=((B18-1)/SQRT(B18))*SQRT((TINV(0,05/B18,B18-2))^2/(B18-2+TINV(0,05/B18,B18-2)^2))$								
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									

$$G_{critical} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n)}^{n-2}}{n-2 + t_{(0,05/n)}^{n-2}}}$$



- Ιξώδες για JET A1 ASTM D 7042

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	<b>OUTLIER TEST (Grubbs)</b>									
2										
3		Data				=MIN(a4:c15)				
4	1,6611	1,6621	1,6626	minimum	1,6328					
5	1,6362	1,6454	1,6549	maximum	1,6626					
6	1,6407	1,6484	1,6388							
7	1,6328	1,6624	1,642							
8	1,6369	1,6427	1,6388							
9	1,6362	1,6422	1,6422							
10	1,6372									
11	1,6392									
12	1,637									
13	1,6387									
14	1,6378									
15	1,6398									
16	Average	1,644004								
17	Stdev	0,009376								
18	n	24								
19										
20	G'min	1,195021								
21	G'max	1,983406								
22										
23	G'crit	2,801551								
24										
25										
26										
27	=((B18-1)/SQRT(B18))*SQRT((TINV(0,05/B18;B18-2))^2/(B18-2+TINV(0,05/B18;B18-2)^2))									
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36										
37										
38										
39										

$$G_{critical} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(0,05/n)^{n-2}}^2}{n-2 + t_{(0,05/n)^{n-2}}^2}}$$

## Παράρτημα 2

- Πυκνότητα Jet A1 ASTM D 7042

QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS	POSOSTO
Random error	kg/m <sup>3</sup>	794,794				0,17114416	1	0,171144157		13%
Instrument	kg/m <sup>3</sup>	0,000	0,500	Rectangular	1,732051	0,28867513	1	0,288675135	από Manual	36%
Bias (ASTM)	(ppm)	-	0,600	Rectangular	1,732051	0,34641016	1	0,346410162	από ASTM	52%

<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>	0,482 kg/m <sup>3</sup>
<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>	0,965 kg/m <sup>3</sup>

- Πυκνότητα JP 8 ASTM D 4052

QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS	POSOSTO
Random error	kg/m <sup>3</sup>	800,335				0,05522476	1	0,055224757		1%
Instrument	kg/m <sup>3</sup>	0,000	0,500	Rectangular	1,732051	0,28867513	1	0,288675135	από Manual	40%
Bias (ASTM)	(ppm)	-	0,600	Rectangular	1,732051	0,34641016	1	0,346410162	από ASTM	58%

<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>	0,454 kg/m <sup>3</sup>
<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>	0,909 kg/m <sup>3</sup>

- Πυκνότητα JP 8 ASTM D 7042

QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS	POSOSTO
Random error	kg/m <sup>3</sup>	800,414				0,09636241	1	0,096362411		4%
Instrument	kg/m <sup>3</sup>	0,000	0,500	Rectangular	1,732051	0,28867513	1	0,288675135	από Manual	39%
Bias (ASTM)	(ppm)	-	0,600	Rectangular	1,732051	0,34641016	1	0,346410162	από ASTM	56%

<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>	0,461 kg/m <sup>3</sup>
<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>	0,922 kg/m <sup>3</sup>

### Παράρτημα 3

- Ιξώδες JP8 ASTM D 7042

QUANTITY	SYMBOL	ESTIMATE	ERROR (EXP. UNCERTAINTY)	DISTRIBUTION	DIVISOR	STANDARD UNCERTAINTY	SENSITIVITY COEFFICIENT	UNCERTAINTY CONTRIBUTION	COMMENTS	POSOSTO
Random error	mm <sup>2</sup> /s	0	1,8			0,004963759	1	0,004963759		1,60%
Bias (proficiency test)	mm <sup>2</sup> /s	-	0,067	Rectangular	1,732051	0,038916657	1	0,038916657		98,11%
Temperature	C	15	0,02	normal	2	0,01	0,072000	0,0007		0,03%
Instrument	mm <sup>2</sup> /s		0,00350	Rectangular	1,732051	0,002020726	1	0,002020726		0,26%

<b>COMBINED UNCERTAINTY</b>	0,039290544 mm <sup>2</sup> /s
<b>TOTAL UNCERTAINTY</b>	0,0786 mm <sup>2</sup> /s

## Παράρτημα 4

Έλεγχος t- Test στις μεθόδους ASTM D 7042 και 4052

- Για Jet A1

Έλεγχος t δύο δειγμάτων με υποτιθέμενες ίσες διακυμάνσεις		
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Μέσος	794,7516	794,7935484
Διακύμανση	0,006581	0,029290323
Μέγεθος δείγματος	31	31
Διάμεση διακύμανση	0,017935	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	60	
t	-1,2328	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,11123	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,670649	
P(T<=t) δίπλευρη	0,222461	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,000298	

- Για JP 8

Έλεγχος t δύο δειγμάτων με υποτιθέμενες ίσες διακυμάνσεις		
	Μεταβλητή 1	Μεταβλητή 2
Μέσος	800,3388889	800,4
Διακύμανση	0,00251634	0,009411765
Μέγεθος δείγματος	18	18
Διάμεση διακύμανση	0,005964052	
Υποτιθέμενη διαφορά μέσων	0	
βαθμοί ελευθερίας	34	
t	-2,373945332	
P(T<=t) μονόπλευρη	0,011694597	
t κρίσιμο, μονόπλευρο	1,690924198	
P(T<=t) δίπλευρη	0,023389193	
t κρίσιμο, δίπλευρο	2,032244498	

## Παράρτημα 5

- Έλεγχος F- test για Jet A 1

Έλεγχος F των διακυμάνσεων δύο δειγμάτων		
	<i>Μεταβλητή 1</i>	<i>Μεταβλητή 2</i>
Μέσος	794,7944444	800,3944444
Διακύμανση	0,04996732	0,007614379
Μέγεθος δείγμα	18	18
βαθμοί ελευθερ	17	17
F	6,56223176	
P(F<=f) μονόπλ	0,000166092	
F κρίσιμο, μονό	2,271892889	

## Παράρτημα 6

- Προδιαγραφές για μέτρηση πυκνότητας με ASTM D 4052

						ASTM
sr	0,050139	repeatability limit	r	0,1	0,1	
sb	0,005486					
						ASTM
sR	0,050438	reproducibility limit	R	0,1	0,5	

- Προδιαγραφές για μέτρηση πυκνότητας με ASTM D 7042

		όριο επαναληψιμότητας (r )	ASTM
sr	0,008370753	0,023438107	0,46
sb	0,004577353	όριο αναπαραγωγισιμότητας (R )	
SR	0,009540527	0,026713476	1,77