



**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ  
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ  
ΡΥΠΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΧΡΥΣΑΓΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Επίβλεψη:  
Λέκτορας Ν. Αρετάκης**

**ΑΘΗΝΑ  
ΙΟΥΛΙΟΣ 2013**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται τα καυσαέρια των αεριοστροβίλων, οι μονάδες μέτρησης τους και η αναγωγή των μετρήσεων. Περιγράφονται οι βασικοί κανονισμοί που πρέπει να ακολουθηθούν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διεξαγωγή μίας μέτρησης καυσαερίων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία συσκευή μέτρησης ρύπων και πιστοποιείται η ακρίβειά της λαμβάνοντας μετρήσεις από βιομηχανικό αεριοστρόβιλο. Αναλύεται ακόμη ο τρόπος υπολογισμού του λόγου αέρα καύσης καθώς και του βαθμού απόδοσης του θαλάμου καύσης με την βοήθεια των καυσαερίων. Παρουσιάζονται ημιεμπειρικές σχέσεις εκτίμησης καυσαερίων οι οποίες χρησιμοποιούν θερμοδυναμικά δεδομένα της μηχανής. Επίσης παρουσιάζεται διαδικασία προσαρμογής των σχέσεων αυτών σε πειραματικά δεδομένα. Ειδικά για αεροπορικούς κινητήρες, περιγράφονται οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι εκτίμησης, οι οποίες κάνουν χρήση δεδομένων από την πιστοποίηση των αεροσκαφών (ICAO). Οι παραπάνω ημιεμπειρικές σχέσεις και μέθοδοι εκτίμησης μοντελοποιούνται και στη συνέχεια εισάγονται στο πρόγραμμα PROOSIS. Για απλές και συνδυασμένες βλάβες προσδιορίζεται η συμπεριφορά των καυσαερίων σε έναν κύκλο προσγείωσης- απογείωσης. Στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των εκπομπών για διαγνωστικούς σκοπούς. Στα πλαίσια αυτά έγινε ανάλυση ευαισθησίας των εκπομπών σε μεταβολές των δεικτών υγείας του κινητήρα. Η ανάλυση αυτή επέτρεψε να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την καταλληλότητα συγκεκριμένων μετρήσεων για την εκτίμηση συγκεκριμένων δεικτών υγείας της μηχανής, τόσο σε επίπεδο συνιστώσας όσο και για ολόκληρη την μηχανή. Παρατηρείται ότι οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά από τις υπόλοιπες εκπομπές καυσαερίων για διαγνωστικούς σκοπούς για τον συμπίεστη υψηλής, ενώ οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου είναι πιο κατάλληλες για τη διάγνωση των στροβίλων. Για τη διάγνωση του FAN μπορούν εξίσου να χρησιμοποιηθούν και τα NOx και τα CO. Τέλος, για ολόκληρη την μηχανή μπορεί να γίνει χρήση του NOx ή του CO αντικαθιστώντας μια εκ των μετρήσεων της εξόδου του συμπίεστη υψηλής.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα λέκτορα κ. Ν. Αρετάκη, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου θερμικών στροβιλομηχανών για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη που έδειξαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1.1</b>
<b>2</b>	<b>ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1</b>	<b>ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....</b>	<b>2.1</b>
<b>2.2</b>	<b>ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΠΑΝΤΩΝ.....</b>	<b>2.3</b>
2.2.1	Διοξείδιο του άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) – Υδρατμοί (H <sub>2</sub> O).....	2.3
2.2.2	Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) .....	2.4
2.2.3	Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC) .....	2.4
2.2.4	Οξείδια του αζώτου .....	2.5
2.2.5	Οξείδια του θείου.....	2.5
<b>2.3</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ.....</b>	<b>2.5</b>
<b>2.4</b>	<b>ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>2.6</b>
2.4.1	Μονάδες μέτρησης αέριων εκπομπών-καπνού(αιθάλης) .....	2.7
2.4.2	Αναγωγή στο Επίπεδο Οξυγόνου.....	2.9
2.4.3	Αναγωγή σε Συνθήκες Τυπικής Ατμόσφαιρας .....	2.9
2.4.4	Υγρό- Ξηρό Καυσαέριο .....	2.11
<b>3</b>	<b>ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ</b>	
<b>3.1</b>	<b>ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ .....</b>	<b>3.1</b>
<b>3.2</b>	<b>ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥΣ.....</b>	<b>3.2</b>
3.2.1	SAMPLING PROBE.....	3.3
3.2.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ .....	3.4
3.2.3	ΟΡΓΑΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ .....	3.4
<b>4</b>	<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ .....</b>	<b>4.1</b>
<b>4.1</b>	<b>ΟΔΗΓΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ .....</b>	<b>4.2</b>
<b>4.2</b>	<b>ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ .....</b>	<b>4.4</b>
4.2.1	CONTROL UNIT.....	4.4

4.2.2	FLUE GAS ANALYZER .....	4.6
4.2.3	FLUE GAS PROBE .....	4.10
<b>4.3</b>	<b>ΟΔΗΓΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....</b>	<b>4.11</b>
4.3.1	ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ CONTROL UNIT .....	4.11
4.3.2	ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ FLUE GAS PROBE .....	4.14
<b>4.4</b>	<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ .....</b>	<b>4.15</b>
<b>5</b>	<b>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ.....</b>	<b>5.1</b>
<b>5.1</b>	<b>ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ.....</b>	<b>5.1</b>
5.1.1	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	5.1
5.1.2	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ.....	5.6
<b>6</b>	<b>ΗΜΙΕΜΠΕΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ .....</b>	<b>6.1</b>
6.1	ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ NO <sub>x</sub> .....	6.1
6.2	ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ CO .....	6.14
6.3	ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΚΑΥΣΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ .....	6.16
6.4	ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΠΝΟΥ.....	6.18
<b>6.5</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....</b>	<b>6.18</b>
6.6	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΗΜΙΕΜΠΕΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ.....	6.25
<b>7</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΙΕΜΠΕΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΟ PROOSIS ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>7.1</b>
7.1	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ BURNER.....	7.1
7.2	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ BURNER ΣΕ ΕΝΑ TURBOFAN .....	7.4
7.3	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....	7.15
<b>8</b>	<b>ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>8.1</b>
<b>9</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>9.1</b>



<b>Π1</b>	<b>LASER SPECTROSCOPY ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ.....</b>	<b>1</b>
<b>Π1.1</b>	<b>Η ΤΕΧΝΙΚΗ TDLAS.....</b>	<b>1</b>



# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα καυσαέρια που παράγονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζουν αρνητικά ολόένα και περισσότερο τόσο το περιβάλλον όσο και τον ίδιο τον άνθρωπο. Εξαιτίας αυτού, αρκετές χώρες επιβάλλουν συνεχώς αυστηρότερους κανονισμούς καυσαερίων για να ελέγξουν και να περιορίσουν την εκπεμπόμενη ποσότητα τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται οι τρόποι μέτρησης και εκτίμησης των εκπομπών καυσαερίων σε αεριοστροβίλους, γίνεται μοντελοποίηση των ημιεμπειρικών σχέσεων εκτίμησης καυσαερίων και έλεγχος της διαγνωστικής τους χρησιμότητας. Πιο αναλυτικά τα κεφάλαια που ακολουθούν αφορούν τα εξής:

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα καυσαέρια των βιομηχανικών αεριοστροβίλων και αεροπορικών κινητήρων που επηρεάζουν τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Αναφέρονται οι βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού των ρυπαντών αυτών καθώς και οι τρόποι μείωσής τους. Επίσης παρουσιάζονται οι μονάδες μέτρησης των καυσαερίων και αναλύονται οι κανονισμοί εκείνοι που είναι απαραίτητοι για την αναγωγή των καυσαερίων σε μια ενιαία βάση πάνω στην οποία θα μπορούν οι μετρήσεις των καυσαερίων να συγκριθούν και να αξιολογηθούν.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στον τρόπο που πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις εκπομπών καυσαερίων σε αεριοστροβίλους καθώς και τι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πριν τη διεξαγωγή της μέτρησης, κατά τη διάρκεια και μετά από αυτήν σύμφωνα με το ISO11042-1. Ακόμη περιγράφονται τα βασικά όργανα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των καυσαερίων. Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται μόνο σε βιομηχανικούς αεριοστροβίλους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της μετρητικής συσκευής εκπομπών ρύπων που διαθέτει το εργαστήριο θερμικών στροβιλομηχανών. Γίνεται περιγραφή των διαφόρων συνιστωσών της συσκευής και περιγράφεται ο τρόπος διεξαγωγής μιας μέτρησης λαμβάνοντας υπόψη τις οδηγίες ασφαλείας. Ακόμη, για την πιστοποίηση της συσκευής συλλέχθηκαν μετρήσεις για τα καυσαέρια ενός βιομηχανικού αεριοστροβίλου και συγκρίθηκαν οι αποκλίσεις των μετρήσεων αυτών σε σχέση με τις μετρήσεις από τη μονάδα ελέγχου του αεριοστροβίλου.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιγράφει τον τρόπο εκτίμησης του λόγου αέρα καύσης και το βαθμό απόδοσης του θαλάμου καύσης με την βοήθεια της περιεκτικότητας των καυσαερίων. Έχοντας δηλαδή πιο συγκεκριμένα τις περιεκτικότητες του οξυγόνου, του

μονοξειδίου του άνθρακα, των άκαυστων υδρογονανθράκων και τον τύπο του καυσίμου ως δεδομένα, είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο λόγος αέρα καύσης και ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης ως μια πρώτη εκτίμηση.

Το έκτο κεφάλαιο παραθέτει όσες ημιεμπειρικές σχέσεις κατάφεραν να συλλεχθούν από την ανοιχτή βιβλιογραφία για την εκτίμηση των οξειδίων του αζώτου, του μονοξειδίου του άνθρακα, των άκαυστων υδρογονανθράκων και του καπνού. Ακόμη περιγράφεται η διαδικασία προσαρμογής αυτών των σχέσεων αυτών σε πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι για την εκτίμηση των ρύπων σε αεροπορικούς κινητήρες και οι οποίες κάνουν χρήση των δεδομένων από την πιστοποίηση των αεροσκαφών (ICAO). Γίνεται εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων και των προσαρμοσμένων σχέσεων σε μία ανάλυση αποστολής.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μοντελοποίηση όλων των ημιεμπειρικών σχέσεων και των μεθόδων στο πρόγραμμα PROOSIS. Δημιουργείται μία συνιστώσα (Component) ενός μοντέλου θαλάμου καύσης, η οποία έχει την δυνατότητα να υπολογίζει τις εκπομπές των καυσαερίων με όλες τις παραπάνω σχέσεις και μεθόδους. Το μοντέλο αυτού του θαλάμου καύσης χρησιμοποιείται στην συνέχεια σε έναν αεροπορικό κινητήρα (turbofan διπλού τυμπάνου χωρίς ανάμειξη) αντικαθιστώντας τον θάλαμο καύσης που προϋπήρχε. Μελετάται η μεταβολή των καυσαερίων για μία απλή ή συνδυασμένη βλάβη και διερευνάται κατά πόσο μπορούν τα καυσαέρια αυτά να χρησιμοποιηθούν για διαγνωστικούς σκοπούς.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μία ανακεφαλαίωση όλων των παραπάνω και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

# 2

## ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των βασικότερων ρυπαντών αεριοστροβίλων που επηρεάζουν την υγεία του ανθρώπου αλλά και το περιβάλλον. αναφέρονται οι βασικοί μηχανισμοί σχηματισμού ρυπαντών και οι τρόποι αποφυγής τους. Επίσης παρουσιάζονται οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την ποσοτικοποίηση των αέριων εκπομπών και αναλύονται οι κανονισμοί εκείνοι που είναι απαραίτητοι για την αναγωγή των καυσαερίων σε μια ενιαία βάση πάνω στην οποία μπορούν οι μετρήσεις των καυσαερίων να συγκριθούν και να αξιολογηθούν.

### **2.1 ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Οι ρυπαντές είναι ουσίες, στερεές, υγρές ή αέριες που εκπέμπονται από τις εφαρμογές της ανθρώπινης δραστηριότητας, ή προκύπτουν μετά από την αλληλεπίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας με το οικοσύστημα, και οι οποίες επιφέρουν άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου αλλά και όλων των έμβιων οργανισμών.

Οι ρυπαντές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

→τους πρωτογενείς ρυπαντές, οι οποίοι εκπέμπονται άμεσα από την ανθρώπινη δραστηριότητα, και

→τους δευτερογενείς ρυπαντές που προκύπτουν από τους πρωτογενείς ρυπαντές μετά από αλληλεπίδρασή τους με το οικοσύστημα.

Όσον αφορά τους αεριοστροβίλους, όπως και όλες οι μηχανές που χρησιμοποιούν για καύσιμο μίγμα υδρογονανθράκων, εκπέμπουν κυρίως διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και υδρατμούς ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Επειδή όμως η καύση στην πραγματικότητα δεν είναι τέλεια(ατελής καύση), εμφανίζονται και άλλα συστατικά κατά την οξείδωση του καυσίμου. Τα συστατικά αυτά είναι συνήθως τα εξής:

- Μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ )
- Οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}, \text{NO}_2, \text{N}_2\text{O}$ )
- Οξείδια του θείου ( $\text{SO}_2, \text{SO}_3$ )
- Άκαυστοι υδρογονάνθρακες ( $\text{C}_x\text{H}_y$ )

- Ενώσεις μετάλλων
- Αιθάλη και άλλα συστατικά σε πολύ μικρές ποσότητες

Από τους παραπάνω ρύπους δίνεται ιδιαίτερη έμφαση σε αυτούς που είναι επικίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

#### Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο αέριο και ελάχιστα διαλυτό στο νερό. Το μονοξείδιο του άνθρακα ως πρωτογενής ρυπαντής, λόγω της μικρής ταχύτητας διάχυσης, δημιουργεί πρόβλημα κυρίως στην περιοχή στην οποία εκπέμπεται. Επειδή το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη του αίματος 200 φορές ταχύτερα σε σχέση με το οξυγόνο, καθίσταται ανεπαρκής η τροφοδοσία των ιστών του ανθρώπου με οξυγόνο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε θάνατο (σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων).

#### Οξείδια του θείου (SO<sub>2</sub>,SO<sub>3</sub>)

Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) είναι αέριο άχρωμο, με οξεία ερεθιστική οσμή(για συγκέντρωση μεγαλύτερη από 3ppm). Οξειδώνεται με φωτοχημική ή καταλυτική διαδικασία σε τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>). Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) απορροφώντας την ατμοσφαιρική υγρασία σχηματίζει θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), το οποίο είτε πέφτει στο έδαφος με τη βροχή είτε προσροφάται από τα αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζοντας θειικά άλατα σε μορφή σωματιδίων. Εξαιτίας κυρίως αυτού του φαινομένου σχηματίζεται η όξινη βροχή, βασικό συστατικό της οποίας είναι το θειικό οξύ. Τα οξείδια του θείου ερεθίζουν το αναπνευστικό σύστημα και προκαλούν μείωση της ορατότητας. Σοβαρές βλάβες προκαλούνται στο φυτικό κόσμο καθώς το διοξείδιο του θείου σε μεγάλες συγκεντρώσεις μειώνει την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα, ενώ σε μικρές συγκεντρώσεις είναι χρήσιμο γιατί αναπληρώνει το θείο σε εδάφη όπου υπάρχει έλλειψη σε θειικά άλατα. Ακόμη τα οξείδια του θείου συνεισφέρουν σε ταχύτατους μηχανισμούς διάβρωσης σε μέταλλα όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός και το νικέλιο αλλά και σε μάρμαρα γι' αυτό θεωρούνται υπεύθυνα για την καταστροφή των μνημείων.

#### Οξείδια του αζώτου(NO,NO<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>O)

Το άζωτο αποτελεί το 79% του όγκου του αέρα που εισπνέουμε, οξείδια του οποίου σχηματίζονται κατά την καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσεως(π.χ. αεριοστρόβιλοι) και σε κλιβάνους όπου καίγονται ορυκτά καύσιμα. Από τα οξείδια του αζώτου που σχηματίζονται (NO<sub>x</sub>), αυτά που βρίσκονται σε αξιόλογες συγκεντρώσεις είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O), ενώ από τις τρεις αυτές ενώσεις μόνο το NO και το NO<sub>2</sub>

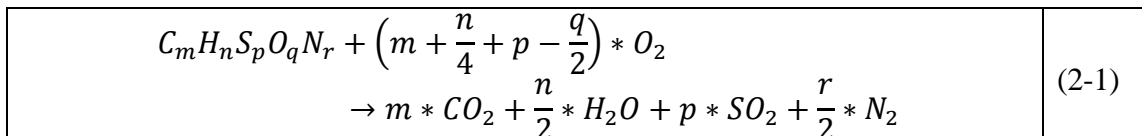
δημιουργούν προβλήματα ρύπανσης στον αέρα. Από τα δύο αυτά οξείδια μόνο το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) θεωρείται τοξικό στις συνήθεις συγκεντρώσεις. Το διοξείδιο του αζώτου έχει έντονη μυρωδιά και καφεκόκκινο χρώμα, ερεθίζει τα μάτια, τη μύτη, το βρογχικό σύστημα και τους πνεύμονες. Όταν έλθει σε επαφή με την υγρασία, είτε στον αέρα είτε στο ανθρώπινο σώμα, σχηματίζεται το εξαιρετικά διαβρωτικό νιτρικό οξύ. Τα οξείδια του αζώτου θεωρούνται ότι κατέχουν το δεύτερο ρόλο, μετά τις ενώσεις θείου, στη συμβολή του σχηματισμού όξινης βροχής.

## 2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΡΥΠΑΝΤΩΝ

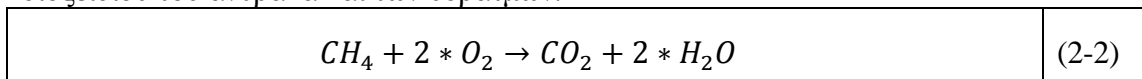
Για τον καθορισμό των διαφόρων ρυπαντών, που σχηματίζονται από την αντίδραση του καυσίμου με τον αέρα, παίζουν σημαντικό ρόλο αρκετοί παράγοντες, οι βασικότεροι των οποίων είναι η θερμοκρασία που διεξάγεται η καύση, οι συγκεντρώσεις των διαφόρων συστατικών είτε του καυσίμου είτε του αέρα και ο χρόνος παραμονής του καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Σε γενικές γραμμές, όταν η μηχανή δουλεύει σε χαμηλά φορτία οι κύριοι ρυπαντές που αναπτύσσονται είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC), ενώ σε υψηλά φορτία ο καπνός και τα οξείδια του αζώτου παρουσιάζουν τις μέγιστες συγκεντρώσεις. Παρακάτω θα γίνει μια περιγραφή των μηχανισμών ανάπτυξης των βασικών συστατικών των καυσαερίων από αεριοστρόβιλους.

### 2.2.1 Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) – Υδρατμοί (H<sub>2</sub>O)

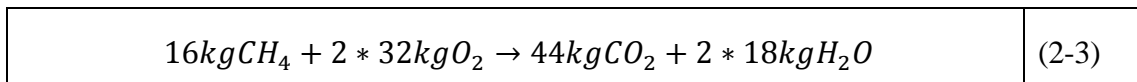
Το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί αποτελούν τα κύρια συστατικά των καυσαερίων των αεριοστροβίλων που παράγονται από την οξείδωση του καυσίμου. Όταν γνωρίζουμε τον μοριακό τύπο του καυσίμου μπορούμε να εκτιμήσουμε την περιεκτικότητα των δύο αυτών συστατικών χρησιμοποιώντας την χημική αντίδραση της καύσης που φαίνεται παρακάτω:



Χρησιμοποιώντας την απλή χημική αντίδραση του μεθανίου (CH<sub>4</sub>) με το οξυγόνο, μπορεί να δοθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της περιεκτικότητας του διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών.



Η παραπάνω εξίσωση γράφεται διαφορετικά ως εξής:



Βλέπουμε λοιπόν ότι από την καύση 1kg CH<sub>4</sub> παράγονται 44/16=2.75kg CO<sub>2</sub> και 2\*18/16=2.25kg H<sub>2</sub>O.

### **2.2.2 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)**

Το μονοξείδιο του άνθρακα αποτελεί ενδιάμεσο προϊόν της καύσης. Με περαιτέρω οξείδωσή του μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, πράγμα που σημαίνει πως η εμφάνισή του στα καυσαέρια οφείλεται στην απουσία οξυγόνου κατά τη διάρκεια της καύσης. Πιο ειδικά, το μονοξείδιο του άνθρακα σχηματίζεται όταν εμφανιστούν ένας ή περισσότεροι από τους παρακάτω παράγοντες:

- A) ανεπαρκείς ρυθμοί καύσης στην αρχική ζώνη αντίδρασης του θαλάμου καύσης λόγω είτε έλλειψης επαρκούς οξυγόνου είτε χαμηλής θερμοκρασίας καύσης.
- B) ανεπαρκής ανάμειξη του καυσίμου με τον αέρα
- Γ) σβήσιμο των προϊόντων της καύσης πριν την ολοκλήρωσή της.

Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό καύσης και συνεπώς τις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι η θερμοκρασία εισόδου του αέρα στη μηχανή και στο θάλαμο καύσης, η πίεση στο θάλαμο καύσης και ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου.

### **2.2.3 Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC)**

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες είναι μόρια καυσίμου στην αρχική τους μορφή ή μικρότερου μοριακού βάρους εξαιτίας μερικής οξείδωσης ή πυρόλυσης. Η παρουσία των ενώσεων αυτών στα καυσαέρια είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης όπως και του μονοξειδίου του άνθρακα, γι' αυτό και εμφανίζει τις μέγιστες συγκεντρώσεις σε συνθήκες που και το μονοξείδιο του άνθρακα μεγιστοποιείται. Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες μειώνονται όταν η θερμοκρασία και η πίεση στο θάλαμο καύσης αυξάνεται και όταν ο λόγος αέρα καύσης πλησιάζει τη βέλτιστη τιμή του.



### **2.2.4 Οξειδία του αζώτου**

Όπως έχουμε πει τα μόνα οξειδία του αζώτου τα οποία, στις ποσότητες που βρίσκονται, προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση είναι τα NO και NO<sub>2</sub> τα οποία ονομάζονται συνοπτικά NO<sub>x</sub>. Τα NO<sub>x</sub>, ανάλογα με το μηχανισμό σχηματισμού τους, χωρίζονται σε 4τέσσερις κατηγορίες:

- **Θερμικά NO<sub>x</sub>.** Τα θερμικά οξειδία του αζώτου σχηματίζονται στις θερμές περιοχές του θαλάμου καύσης. Ο ρυθμός των θερμικών οξειδίων του αζώτου αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία καύσης.
- **Στιγμιαία NO<sub>x</sub>.** Σχηματίζονται στην περιοχή της φλόγας. Για στοιχειομετρικές συνθήκες καύσης οι συγκεντρώσεις του στιγμιαίου NO<sub>x</sub> είναι μικρές, ενώ αυξάνουν όσο απομακρυνόμαστε από την στοιχειομετρική καύση.
- **NO<sub>x</sub> καυσίμου.** Τα NO<sub>x</sub> καυσίμου είναι προϊόντα από την οξείδωση του αζώτου που υπάρχει στο καύσιμο, εάν βέβαια το καύσιμο περιέχει άζωτο. Η εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων για τον σχηματισμό τους είναι δύσκολη. Μπορούμε όμως να εκτιμήσουμε τις συγκεντρώσεις του NO<sub>x</sub> καυσίμου γνωρίζοντας τη σύσταση του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο.
- **NO<sub>x</sub> από υποξείδιο του αζώτου.** Το υποξείδιο του αζώτου το οποίο αποτελεί ένα ενδιάμεσο προϊόν οξείδωσης του ατμοσφαιρικού αζώτου μπορεί να μετατραπεί με διάφορους μηχανισμούς όπως η περαιτέρω οξείδωση σε μονοξείδιο του αζώτου

### **2.2.5 Οξειδία του θείου**

Ο σχηματισμός οξειδίων του θείου οφείλεται αποκλειστικά στην ποσότητα του θείου που βρίσκεται στο καύσιμο. Το θείο όταν καεί σχηματίζει διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) σε ποσοστό 95%-98%, ενώ το υπόλοιπο σχηματίζει τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>).

## **2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ**

Όπως έχει αναφερθεί, οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό ρύπων είναι η θερμοκρασία, ο λόγος αέρα καύσης, η ομοιογένεια του μίγματος αέρα-καυσίμου, ο χρόνος παραμονής του καυσίμου στην αρχική ζώνη αντίδρασης και το πιθανό στιγμιαίο σβήσιμο της φλόγας κατά μήκος των τοιχωμάτων. Γι' αυτό οι παράγοντες αυτοί πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε να μειωθούν οι εκπεμπόμενοι ρύποι.

Το μονοξείδιο του άνθρακα και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, ρύποι που μεγιστοποιούνται κάτω από τις ίδιες συνθήκες, μπορούν να μειωθούν με την εφαρμογή μίας ή περισσότερων από τις παρακάτω μεθόδους:

- Βελτίωση του διασκορπισμού του καυσίμου
- Ανακατανομή του αέρα για να επιτευχθούν στην πρωτεύουσα ζώνη τοπικοί λόγοι αέρα καύσης κοντά στις βέλτιστες (~0.7)
- Αύξηση του χρόνου παραμονής στην πρωτεύουσα ζώνη
- Ελάττωση του αέρα ψύξης του μανδύα
- Διαβάθμιση του καυσίμου. Αυτό είναι στην ουσία η αποκοπή της παροχής του καυσίμου από ορισμένα ακροφύσια καυσίμου και όχι ομοιόμορφα.

Όσον αφορά τα οξείδια του αζώτου, αυτά έρχονται σε σύγκρουση με το μονοξείδιο του άνθρακα και τους άκαυστους υδρογονάνθρακες καθώς όποια ρύθμιση μειώνει την περιεκτικότητα της μιας ομάδας ρύπων αυξάνει την περιεκτικότητα της άλλης. Γι' αυτό πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα η αναλογία αέρα- καυσίμου στην καύση του καυσίμου ώστε να μην αυξηθούν το μονοξείδιο του άνθρακα και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες. Ακόμη η μείωση των οξειδίων του αζώτου απαιτεί την μείωση της θερμοκρασίας καύσης καθώς και την ελάττωση του χρόνου παραμονής. Τέλος τα οξείδια του αζώτου, έχει παρατηρηθεί, ότι μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας ομογενή καύση.

Τα οξείδια του θείου είναι ένας ακόμη ρυπογόνος παράγοντας που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Η οξειδωση του θείου όμως, που περιέχεται στο καύσιμο είναι αναπόφευκτη, με οποιονδήποτε τρόπο και αν πραγματοποιηθεί η καύση. Γι' αυτό, ο μόνος τρόπος να περιορισθούν οι εκπομπές οξειδίων του θείου, είναι να αφαιρεθεί το θείο από το καύσιμο κατά τη διύλισή του. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη χημική επεξεργασία του καυσίμου (π.χ. πλύση με ενώσεις που δεσμεύουν το θείο).

## **2.4 ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΥΠΑΝΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά όλων των βασικών μονάδων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση και ποσοτικοποίηση των εκπεμπόμενων ρύπων καθώς και οι σχέσεις μεταξύ τους. Ακόμη οι μετρήσεις αυτές, για να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους, είναι απαραίτητο να αξιολογούνται με βάση την ίδια περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο και σε συνθήκες τυπικής ατμόσφαιρας. Γι' αυτό και στην ενότητα αυτή δίνονται οι σχέσεις εκείνες που κάνουν αναγωγή στις συνθήκες τυπικής ατμόσφαιρας και στο επίπεδο οξυγόνου. Τέλος, γίνεται σύγκριση μεταξύ του υγρού και ξηρού καυσαερίου.

**2.4.1 Μονάδες μέτρησης αέριων εκπομπών-καπνού(αιθάλης)**

Οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται επί το πλείστον για την ποσοτικοποίηση αέριων εκπομπών είναι το ποσοστό του όγκου του συγκεκριμένου αερίου στα καυσαέρια και ο αριθμός γραμμαρίων αερίου ανά kg καυσίμου. Η πρώτη μονάδα μέτρησης ονομάζεται δείκτης εκπομπών (Emission Index) και εκφράζει τη μάζα της εκπεμπόμενης ουσία ανά μάζα καιόμενου καυσίμου:

$EI_i = \frac{m_{i,emitted}}{m_{f,burned}}$	(2-4)
---	-------

Στις δοκιμές έναυσης καύσης και σε μηχανές Diesel οι εκπομπές μετρούνται σε ροή μάζας ανηγμένη στη παραγόμενη ισχύ (Mass Specific Emission). Χρησιμοποιούνται λοιπόν μονάδες όπως gr/KW\*hr ή gr/HP\*hr. Η μετατροπή από τις μονάδες του δείκτη εκπομπών σε ροή μάζας ανά παραγόμενη ισχύ γίνεται:

$(MSE)_i = \frac{m_f * EI_i}{W}$	(2-5)
----------------------------------	-------

όπου  $m_f$  είναι η παροχή του καυσίμου και  $W$  η παραγόμενη ισχύς.

Μια ακόμα μονάδα που χρησιμοποιείται είναι η μάζα του παραγόμενου ρυπαντή ανά παραγόμενη ενέργεια από το καύσιμο:  $EI_i/\Delta H_c$  όπου  $\Delta H_c$  είναι η θερμότητα που παράγεται από την καύση. Οι συνηθισμένες μονάδες το συγκεκριμένου μεγέθους είναι gr/MJoule και lb/MMBTU (όπου MMBTU=10<sup>6</sup>\*BTU).

Αρκετά συχνά η συγκέντρωση αέριων ρύπων εκφράζεται και σε μάζα ή όγκο ανά όγκο παραγόμενων καυσαερίων. Η συχνότερα απαντώμενη μονάδα στα καυσαέρια είναι η ppmv (parts per million volume, μέρη όγκου ανά εκατομμύριο) και αναφέρεται σε κάποιο επίπεδο οξυγόνου και υγρό ή ξηρό καυσαέριο. Με τον ίδιο τρόπο όταν προτιμάται η έκφραση σε μονάδες μάζας χρησιμοποιείται η μάζα ρυπαντή ανά όγκο παραγόμενων καυσαερίων. Ο όγκος όμως των παραγόμενων καυσαερίων εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος θεωρούνται για όλες τις μετρήσεις συνθήκες πίεσης 101,325Nt/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία 0°C. Στις συνθήκες αυτές ο όγκος ενός γραμμορίου τελείου αερίου είναι σταθερός και ίσος με 22,4lt. Ο όγκος των καυσαερίων μετράται σε κανονικά κυβικά μέτρα(Nm<sup>3</sup>). Οι συγκεντρώσεις δίνονται λοιπόν σε αυτή την περίπτωση σε γραμμάρια ανά κανονικό κυβικό μέτρο καυσαερίου(gr/Nm<sup>3</sup>). Οι δύο παραπάνω μονάδες συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$x \left( \frac{gr}{Nm^3} \right) = x(ppmv) * \frac{MW_x}{22.4} \frac{273}{288}$	(2-6)
--	-------

όπου το  $MW_x$  είναι το μοριακό βάρος του εξεταζόμενου ρύπου.

Όλες οι παραπάνω μονάδες μέτρησης αναφέρονται στην ποσοτικοποίηση των αέριων ρυπαντών όπως το  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$  και υδρατμών. Για την ποσοτικοποίηση της αιθάλης χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές μέτρησης: οπτική παρατήρηση της αδιαφάνειας του πλουμίου και μέτρηση της αιθάλης που περιέχεται στα καυσαέρια. Η πρώτη τεχνική μέτρησης δεν γίνεται από κάποια διάταξη οργάνων μέτρησης αλλά από έμπειρους και εκπαιδευμένους παρατηρητές και εκφράζεται σε μονάδες επί τις εκατό(%). Η μέτρηση της αιθάλης που περιέχεται στα καυσαέρια γίνεται καθώς γνωστός όγκος καυσαερίου οδηγείται μέσω ειδικού χάρτινου φίλτρου. Στη συνέχεια μετράται η ποσοστιαία αμαύρωση συγκρίνοντας την αντανάκλαση του φωτός σε ένα καθαρό φίλτρο με την αντίστοιχη στο αμαυρωμένο φίλτρο. Μετά από αυτό ορίζεται ο ‘αριθμός καπνού’:

$SN = 100 \left( 1 - \frac{R}{R_0} \right)$	(2-7)
---	-------

όπου

SN: smoke number, καθαρός αριθμός

R: απόλυτη αντανάκλαση του αμαυρωμένου φίλτρου

$R_0$ : απόλυτη αντανάκλαση του καθαρού φίλτρου

Από τον αριθμό καπνού ορίζεται η μονάδα Bosch Smoke Number:

$BSN = \frac{\text{Αμαύρωση}\%}{10} = \frac{SN}{10}$	(2-8)
--	-------

από την οποία προκύπτει ο αριθμός Bacharach, που είναι η συχνότερη μονάδα μέτρησης αιθάλης:

$\text{Bacharach} = 0.8 * BSN$	(2-9)
--------------------------------	-------

### 2.4.2 Αναγωγή στο Επίπεδο Οξυγόνου

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως έχει αναφερθεί, οι εκπομπές των αέριων ρύπων εκφράζονται σε όγκο ή μάζα ανά όγκο καυσαερίου (ppmv, gr/Nm<sup>3</sup>) γι' αυτό χρειάζεται να ανάγουμε αυτές τις τιμές σε ένα κοινό τυπικό επίπεδο οξυγόνου ώστε να αποφεύγεται η επίδραση του φαινομένου της αραίωσης.

Η μετατροπή συγκέντρωσης ενός ρυπαντή σε επίπεδο οξυγόνου διαφορετικό από αυτό που έχουν γίνει οι μετρήσεις, γίνεται με την εξής σχέση:

$x_i(\text{level2\_O2\%}) = x_i(\text{level1\_O2\%}) * \frac{(20.95 - \text{level2\_O2\%})}{(20.95 - \text{level1\_O2\%})}$	(2-10)
---	--------

όπου  $x_i$  είναι η συγκέντρωση του αερίου ρύπου σε μέρη όγκου ανά εκατομμύριο καυσαερίου (ppmv) και 20.95% η περιεκτικότητα σε οξυγόνο του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα.

Όπως περιγράφεται στο πρότυπο ISO 11042-1 το επίπεδο οξυγόνου που επιλέγεται σαν τιμή αναφοράς στο οποίο ανάγονται όλες οι μετρήσεις είναι το 15%. Δηλαδή ανάγονται οι μετρήσεις σε ξηρά καυσαέρια που έχουν 15%O<sub>2</sub>. Έτσι η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$x_i(15\%) = x_i(a) * \frac{(20.95 - 15)}{(20.95 - a)}$	(2-11)
---	--------

όπου  $a$  είναι η περιεκτικότητα σε οξυγόνο του καυσαερίου που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

### 2.4.3 Αναγωγή σε Συνθήκες Τυπικής Ατμόσφαιρας

Ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες της ατμόσφαιρας, δηλαδή της θερμοκρασίας, της πίεσης και της υγρασίας επηρεάζονται οι επιδόσεις και γενικότερα η λειτουργία του αεριοστροβίλου. Από την επίδραση αυτή δημιουργούνται λοιπόν διαφορετικές συνθήκες καύσης με αποτέλεσμα οι εκπομπές των ρύπων να εξαρτώνται από τις εξωτερικές συνθήκες. Προκειμένου λοιπόν να μειωθεί αυτή η επίδραση και να καταστεί δυνατή η σύγκριση εκπομπών, οι μετρήσεις καυσαερίων ανάγονται σε συνθήκες τυπικής ατμόσφαιρας.

Η σχέση που χρησιμοποιείται για την αναγωγή δεικτών εκπομπής των ρύπων NO<sub>x</sub>, CO, και UHC στο Annex 16 του οργανισμού ICAO είναι η ακόλουθη:

$EI_{corrected} = k * EI_{measured}$	(2-12)
--------------------------------------	--------

όπου ο συντελεστής k δίνεται από τη σχέση:

$k = \left(\frac{P_{Bref}}{P_B}\right)^a * \left(\frac{far_{ref}}{far_B}\right)^b * e^{\left(\frac{ T_{Bref}-T_B }{c}\right)} * e^{(d h-0.00629 )}$	(2-13)
---	--------

όπου

P<sub>B</sub>: πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης.

T<sub>B</sub>: θερμοκρασία στην είσοδο του θαλάμου καύσης.

far<sub>B</sub>: λόγος καυσίμου αέρα.

far<sub>ref</sub>: λόγος καυσίμου αέρα αναφοράς για συνθήκες τυπικής ημέρας.

h: ατμοσφαιρική υγρασία.

P<sub>Bref</sub>: πίεση αναφοράς στο θάλαμο καύσης της μηχανής η οποία αντιστοιχεί στη μετρούμενη θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης (T<sub>B</sub>) για ατμοσφαιρικές συνθήκες αναφοράς.

T<sub>Bref</sub>: θερμοκρασία αναφοράς στην είσοδο του θαλάμου καύσης για ατμοσφαιρικές συνθήκες τυπικής ημέρας. Η θερμοκρασία T<sub>Bref</sub> καθορίζεται συναρτήσει της ώσης του κινητήρα.

a,b,c,d: συντελεστές που μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος καυσίμου και τον τύπο αεριοστροβίλου.

Μπορούμε όμως να κάνουμε κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις για την σχέση (2-12) όπως:

→ Ο λόγος far<sub>ref</sub>/far<sub>B</sub> μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να θεωρηθεί μονάδα.

→ έχει παρατηρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας στις εκπομπές CO και UHC είναι σχετικά μικρή και ο αντίστοιχος όρος μπορεί να παραλειφθεί χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα.

→ έχει παρατηρηθεί επίσης ότι ο εκθέτης του όρου πίεσης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μονάδα.

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραπάνω παραδοχές, οι διορθωμένοι δείκτες εκπομπών ως προς τις συνθήκες τυπικής ατμόσφαιρας είναι οι εξής:

$EI_{CO,cor} = EI_{CO,meas} * \left(\frac{P_{Bref}}{P_B}\right) * e^{\left(\frac{ T_{Bref}-T_B }{c}\right)}$	(2-14)
$EI_{UHC,cor} = EI_{UHC,meas} * \left(\frac{P_{Bref}}{P_B}\right) * e^{\left(\frac{ T_{Bref}-T_B }{c}\right)}$	(2-15)
$EI_{NOx,cor} = EI_{NOx,meas} * \left(\frac{P_{Bref}}{P_B}\right)^{0.5} * e^{\left(\frac{ T_{Bref}-T_B }{c}\right)} * e^{(19* h-0.00629 )}$	(2-16)

**2.4.4 Υγρό- Ξηρό Καυσαέριο**

Σε πολλές περιπτώσεις που μετράται η κατ' όγκο σύσταση του καυσαερίου πρέπει να αναφέρεται αν οι μετρήσεις έγιναν σε ξηρό ή υγρό καυσαέριο. Όταν οι μετρήσεις έχουν γίνει σε ξηρό καυσαέριο σημαίνει ότι έχουν πρώτα αφαιρεθεί οι υδρατμοί και μετά καταγράφονται οι συγκεντρώσεις των καυσαερίων ενώ σε υγρό καυσαέριο δεν έχει γίνει κάποια ανάλογη προεργασία. Επειδή όμως οι υδρατμοί επηρεάζουν τις περιεκτικότητες των καυσαερίων είναι αναγκαίο όταν κάνουμε συγκρίσεις μετρήσεων, να μην συγχέουμε αυτές που έγιναν με ξηρό καυσαέριο και με υγρό καυσαέριο. Γι' αυτό, όπως φαίνεται πιο κάτω, χρησιμοποιούμε μία μετατροπή για να περάσουμε από την μία περίπτωση στην άλλη.

Από τον ορισμό των γραμμομοριακών κλασμάτων έχουμε:

$x_{i,DRY} = \frac{N_i}{N_{GAS,DRY}}$	(2-17)
$x_{i,WET} = \frac{N_i}{N_{GAS,WET}}$	(2-18)

Όπου με N συμβολίζονται τα γραμμομόρια του ρύπου, N<sub>GAS</sub> τα γραμμομόρια του καυσαερίου, ενώ οι δείκτες WET, DRY αναφέρονται στο υγρό και ξηρό καυσαέριο αντίστοιχα.

Από τις σχέσεις (2-17) και (2-18) προκύπτει μια συσχέτιση για τα γραμμομοριακά κλάσματα του ρύπου στο ξηρό και υγρό καυσαέριο:

$x_{i,DRY} = x_{i,WET} * \frac{N_{GAS,WET}}{N_{GAS,DRY}}$	(2-19)
---	--------

Ακόμη ισχύει

$N_{GAS,DRY} = N_{GAS,WET} - N_{H2O}$	(2-20)
---------------------------------------	--------

Έτσι προκύπτει η τελική σχέση μετατροπής από ξηρό σε υγρό καυσαέριο:

$x_{i,DRY} = x_{i,WET} * \frac{1}{1 - \frac{N_{H2O}}{N_{GAS,WET}}} = x_{i,WET} * \frac{1}{1 - x_{H2O,WET}}$	(2-21)
---	--------



# 3

## ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον τρόπο που πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις εκπομπών καυσαερίων σε αεριοστρόβιλους καθώς και τι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πριν τη διεξαγωγή της μέτρησης και μετά από αυτήν σύμφωνα με το ISO11042-1. Ακόμη περιγράφονται τα βασικά όργανα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των καυσαερίων. Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται μόνο σε βιομηχανικούς αεριοστρόβιλους.

### **3.1 ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ**

Προτού πραγματοποιηθεί μια μέτρηση εκπομπών καυσαερίων σε αεριοστρόβιλο είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε κάποια βασικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη μηχανή καθώς και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται γιατί όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο υποκεφάλαιο 2.4.3, η επίδραση της ατμόσφαιρας επιδρά σημαντικά στην λειτουργία και τις εκπομπές ενός αεριοστρόβιλου. Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές πληροφορίες που πρέπει να υπάρχουν για τη σωστή αξιολόγηση μίας μέτρησης:

- ο κατασκευαστής και ο τύπος του αεριοστρόβιλου
- η ισχύς και η παροχή του καυσαερίου ή η παροχή του καυσίμου τη στιγμή που γίνεται η μέτρηση
- γνώση των συνθηκών του περιβάλλοντος την στιγμή της μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία του αέρα περιβάλλοντος)
- δεδομένα για τον τύπο του καυσίμου ή την σύστασή του
- εξοπλισμός της μηχανής που βρίσκεται σε λειτουργία και μπορεί να επηρεάσει τις εκπομπές των καυσαερίων (καταλυτικοί μετατροπείς, έγχυση νερού ή ατμού)

Οι συνθήκες τυπικής ημέρας είναι οι εξής:

- Πίεση: 101.3kPa
- Θερμοκρασία: 15°C
- Υγρασία: 60%

Όσον αφορά τις μονάδες μέτρησης των διάφορων εκπομπών καυσαερίων, αυτές αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.4.1. Για την πραγματοποίηση μιας μέτρησης είναι απαραίτητο ο αεριοστρόβιλος να λειτουργεί σε σταθερές συνθήκες, να έχει φτάσει δηλαδή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του είτε στο ονομαστικό είτε σε κάποιο άλλο φορτίο. Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η μεταβολή της υγρασίας της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Δεν πρέπει η μεταβολή της υγρασίας, εκφρασμένη σε gr νερού ανά kg ξηρού αέρα, να ξεπερνάει τα 0.6 gr/kg κατά τη διαδικασία της δοκιμής της μέτρησης. Ακόμη, όλο το σύστημα πρέπει να ελέγχεται σε τακτικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να ελέγχεται η στεγανότητα των διαφόρων διατάξεων και να γίνονται οι έλεγχοι όλου του εξοπλισμού σε διαστήματα που συνιστά ο κατασκευαστής.

Ο ελάχιστος αριθμός μετρήσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν για να θεωρηθεί αξιόπιστη η μέτρηση είναι τρεις. Ο ελάχιστος χρόνος για κάθε μέτρηση πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα λεπτό συν το χρόνο απόκρισης του συστήματος. Τέλος οι αναλυτές, δηλαδή τα όργανα που διαχωρίζουν και ποσοτικοποιούν τις εκπομπές των καυσαερίων, πρέπει να βαθμονομούνται πριν και μετά τις μετρήσεις.

### 3.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥΣ

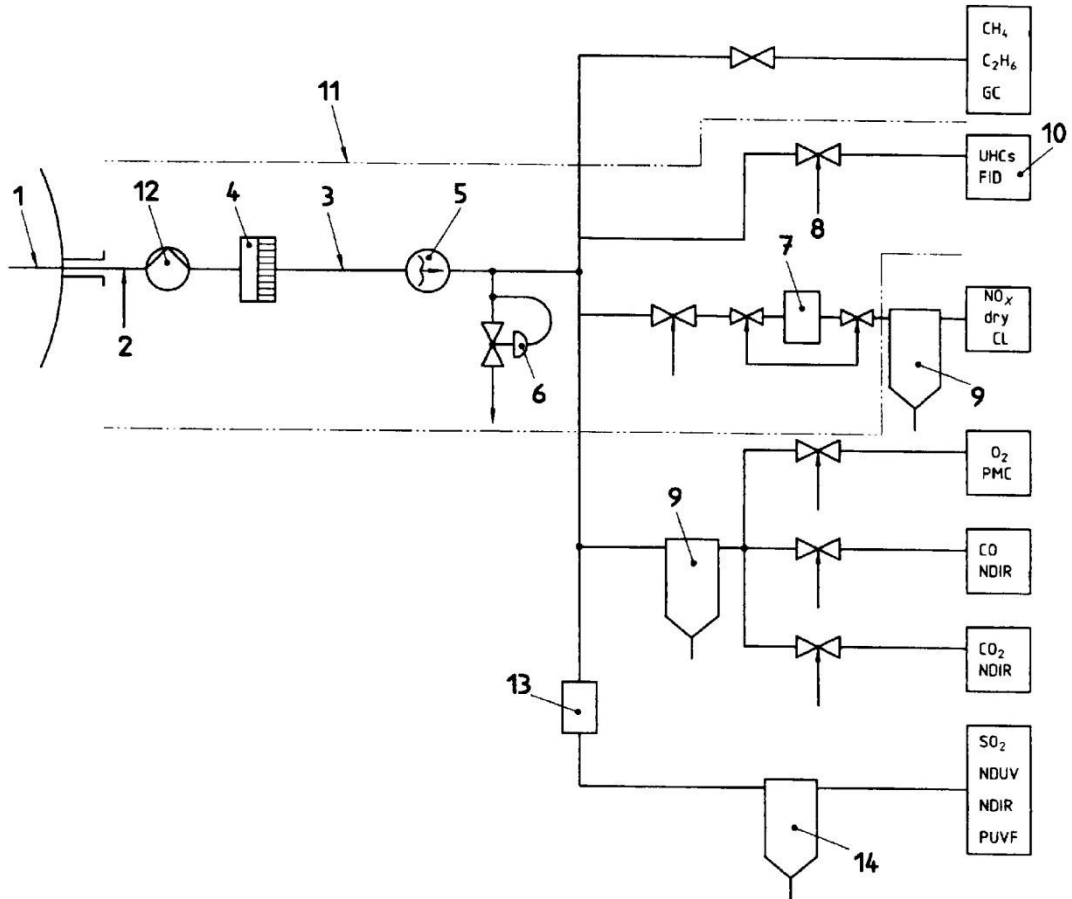
Για την πραγματοποίηση μιας μέτρησης είναι αναγκαίο να υπάρχει η κατάλληλη διάταξη που θα συλλέξει το καυσαέριο, θα το αναλύσει και θα βγάλει τα τελικά αποτελέσματα για τις συγκεντρώσεις των καυσαερίων. Πιο συγκεκριμένα η διάταξη αυτή αποτελείται από τα εξής τμήματα:

→Καθετήρας(sampling probe)

→σύστημα μεταφοράς και κλιματισμού

→όργανα που αναλύουν τα καυσαέρια και εμφανίζουν τα τελικά αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται μία τυπική διάταξη των βασικών οργάνων.



**Key**

- 1 Probe
- 2 Gas inlet for system check
- 3 Sample line
- 4 Filter
- 5 Sample pump
- 6 Back-pressure regulator
- 7 NO<sub>2</sub> → NO converter
- 8 Gas inlet for instrument calibration
- 9 Chiller/separator (operating at ≤ 3 °C)
- 10 Analyser
- 11 Heated section
- 12 Dump pump to vent (if required)
- 13 SO<sub>x</sub> → SO<sub>2</sub> converter
- 14 Water trap or permeation tube dryer

Σχήμα 3.1: Διάταξη οργάνων για μέτρηση αέριων ρύπων

**3.2.1 SAMPLING PROBE**

Το sampling probe είναι στην ουσία ένας σωλήνας στον οποίο εισέρχεται ένα δείγμα καυσαερίων και το οποίο καταλήγει μέσω του συστήματος μεταφοράς στα όργανα που αναλύουν το καυσαέριο. Το sampling probe πρέπει να παρέχει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των καυσαερίων. Για την δημιουργία ενός τέτοιου αντιπροσωπευτικού δείγματος συνιστάται το probe να έχει τρύπες κατά μήκος του ώστε

να συλλέγει καυσαέρια από αρκετές περιοχές του αγωγού καυσαερίων, τα οποία στην πορεία θα αναμιχθούν και θα δημιουργήσουν το αντιπροσωπευτικό δείγμα.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι είναι η τοποθεσία του sampling probe στον αεριοστρόβιλο. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν παρεμβαλλόμενα στοιχεία ανάμεσα στην έξοδο των καυσαερίων από τον στρόβιλο και την έξοδο των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα εκτός από τον σιγαστήρα, τον αγωγό εξόδου και την καμινάδα, το sampling probe καλό θα είναι να τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στην έξοδο των καυσαερίων από τον στρόβιλο. Εάν υπάρχουν άλλα τμήματα του αεριοστρόβιλου που παρεμβάλλονται μεταξύ αυτών των δύο σημείων, όπως ανακομιστές θερμότητας, αναθερμαντήρες, συστήματα αντιμετώπισης των NO<sub>x</sub> κ.τ.λ., τότε το sampling probe πρέπει να τοποθετείται ενδιάμεσα από τα τμήματα που συμμετέχουν στην πιθανή αλλοίωση της τιμής των δεικτών εκπομπής των καυσαερίων.

### **3.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ**

Το σύστημα μεταφοράς και κλιματισμού μεταφέρει μέσω αγωγών τα καυσαέρια από το sampling probe στον ειδικό αναλυτή των καυσαερίων παρέχοντας την κατάλληλη θερμοκρασία στους αγωγούς για την αποφυγή συμπύκνωσης των καυσαερίων. Για την διεξαγωγή μετρήσεων πέρα από ρυπαντές που είναι αέρια (NO<sub>x</sub>, CO κ.τ.λ.) αλλά και για τον καπνό και τα στερεά σωματίδια απαιτούνται τρεις αγωγοί. Όσον αφορά την κατάλληλη θερμοκρασία που πρέπει να έχουν οι αγωγοί, αυτή καθορίζεται από τον τύπο του οργάνου μέτρησης καυσαερίων. Σε γενικές γραμμές πάντως, για την αποφυγή της συμπύκνωσης των καυσαερίων, οι γραμμές που μεταφέρουν το δείγμα καυσαερίου πρέπει να θερμαίνονται έτσι ώστε τα καυσαέρια να βρίσκονται 10 Kelvin πάνω από την θερμοκρασία συμπύκνωσης.

Κάθε σημείο του συστήματος μεταφοράς το οποίο έρχεται σε επαφή με τα καυσαέρια πρέπει να μην διαβρώνεται και να μην αντιδρά εύκολα (ανοξειδωτο ατσάλι ή κάποιο άλλο ισοδύναμο υλικό). Τέλος, πρέπει ο χρόνος που χρειάζεται για τη μεταφορά των καυσαερίων από το probe στον αναλυτή των καυσαερίων να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Συνιστάται να είναι μικρότερος από 30 δευτερόλεπτα.

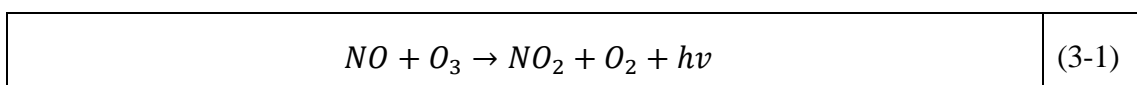
### **3.2.3 ΟΡΓΑΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ**

Για κάθε τύπο καυσαερίου υπάρχουν ένας ή περισσότεροι τύποι αναλυτών που χρησιμοποιούν την δική τους μεθοδολογία για την εκτίμηση της σύστασης του καυσαερίου. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν οι προτεινόμενοι τύποι αναλυτών

από το ISO11042-1 για κάθε τύπο καυσαερίου καθώς και οι βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται.

#### ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΓΙΑ NO<sub>x</sub>

Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στους διάφορους αναλυτές για την ανάλυση των οξειδίων του αζώτου είναι η μέθοδος της χημειοφωταύγειας (Chemiluminescence), με υπέρυθρη ακτινοβολία χωρίς σκέδαση (non-dispersive infrared) και με υπεριώδη ακτινοβολία χωρίς σκέδαση (non-dispersive ultraviolet). Αυτή είναι και η μέθοδος που προτείνεται από το ISO11042-1. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την αντίδραση του μονοξειδίου του αζώτου με το όζον η οποία είναι η εξής:



όπου  $hv$ : η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την αντίδραση

Το διοξείδιο του αζώτου που δημιουργείται βρίσκεται σε ηλεκτρικά διεγερμένη κατάσταση. Σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταπίπτει στη σταθερή κατάσταση εκπέμποντας φως κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Αυτό το φως εντοπίζεται από ένα σωλήνα που είναι πολλαπλασιαστής φωτός και η έντασή του είναι άμεσα συσχετισμένη με την συγκέντρωση του μονοξειδίου του αζώτου (NO). Επειδή με αυτή τη μέθοδο δεν μπορούμε να βρούμε τη συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) χρησιμοποιείται ένας καταλυτικός μετατροπέας που μετατρέπει το διοξείδιο του αζώτου σε μονοξείδιο του αζώτου. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί η συνολική συγκέντρωση των NO<sub>x</sub> και με απλή αφαίρεση να υπολογιστεί η συγκέντρωση του NO<sub>2</sub>. Πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι μόνο ο προσδιορισμός των NO<sub>x</sub> είναι υποχρεωτικός αλλά καλό είναι να υπάρχει και σχετική πληροφορία για τα NO και NO<sub>2</sub>.

#### ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΓΙΑ O<sub>2</sub>

Ο τρόπος ο οποίος προτείνεται από το ISO11042-1 για την ανάλυση του οξυγόνου στα καυσαέρια είναι ο παραμαγνητικός αναλυτής τύπου δύο αερίων. Το οξυγόνο έχει την ιδιότητα να έλκεται από ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Αυτή την ιδιότητα εκμεταλλεύεται ο παραμαγνητικός αναλυτής τύπου δύο αερίων. Δύο αέρια με διαφορετική περιεκτικότητα σε οξυγόνο έρχονται σε επαφή και εισέρχονται σε ένα μαγνητικό πεδίο οπότε αναπτύσσεται μια διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο αερίων. Το ένα από τα δύο αέρια είναι το αέριο του δείγματος καυσαερίων ενώ το άλλο το αέριο αναφοράς το οποίο έχει γνωστή περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Η πίεση αυτή που αναπτύσσεται δημιουργεί μία ροή η οποία ελέγχεται από έναν αισθητήρα ροής και

παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα που δείχνει την περιεκτικότητα σε οξυγόνο του δείγματος καυσαερίου.

#### ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΓΙΑ CO,CO<sub>2</sub> ΚΑΙ ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ

Η μέθοδος που προτείνεται από το ISO11042-1 για την ανάλυση του CO και CO<sub>2</sub> είναι η χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας χωρίς σκέδαση(non-dispersive infrared). Η ικανότητα του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα να απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία είναι η βασική αρχή στην οποία στηρίζεται η μέθοδος αυτή. Ένα υπεριώδες φως εκπέμπεται και περνάει μέσα από το δείγμα καυσαερίων καθώς και από το αέριο αναφοράς το οποίο έχει καθορισμένη σύσταση. Τα δύο αέρια έχοντας διαφορετική σύσταση σε CO και CO<sub>2</sub> απορροφούν διαφορετικές ποσότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να έχουμε μια διαφορά από την οποία μπορούμε να συμπεράνουμε την περιεκτικότητα των δύο μεγεθών.

#### ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΓΙΑ ΑΚΑΥΣΤΟΥΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ

Για τον προσδιορισμό της συνολικής ποσότητας άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC) χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος ιονισμού φλόγας. Όταν οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες καίγονται με τη βοήθεια μιας φλόγας(συνήθως φλόγα υδρογόνου που δεν παράγει ιόντα) παράγονται ιόντα ανάλογα με την ποσότητα των δεσμών των υδρογονανθράκων που σπάνε. Μετρώντας το ρεύμα των ιόντων μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική ποσότητα των υδρογονανθράκων.

Όσον αφορά τους πτητικούς άκαυστους υδρογονάνθρακες (VOC), πρέπει να υπολογιστούν οι συνολικοί άκαυστοι υδρογονάνθρακες και να αφαιρεθούν από αυτούς η ποσότητα του μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και του αιθανίου (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Αυτό γίνεται με την αεριοχρωματογραφία ή σε συνδυασμό με τη μέθοδο ιονισμού φλόγας.

# 4

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ

Οι κανονισμοί για την ποιότητα του αέρα γίνονται όλο και πιο αυστηροί σταδιακά και επιβάλλονται νέα κατώτερα όρια για τις εκπομπές ρύπων. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να μπορούμε να μετρήσουμε εύκολα και γρήγορα τους εκπεμπόμενους ρύπους ώστε να ελέγξουμε την σωστή λειτουργία της μηχανής αλλά και κατά πόσο οι εκπομπές που δηλώνει ο κατασκευαστής έχουν σχέση με την πραγματικότητα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μετρητική συσκευή (TESTO 350-MARITIME) η οποία χρησιμοποιείται για τη συλλογή μετρήσεων εκπομπών ρύπων. Η συσκευή αυτή είναι ένα φορητό σύστημα που αναλύει τα καυσαέρια. Είναι απαραίτητη η γνώση του τρόπου λειτουργίας της συσκευής γιατί αφ' ενός γνωρίζοντας καλά τη συσκευή λαμβάνονται σωστά οι μετρήσεις και αφ' ετέρου δεν υπάρχει κίνδυνος παρουσίας βλάβης εξαιτίας του χρήστη.



Σχήμα 4.1: Η συσκευή TESTO 350

## 4.1 ΟΔΗΓΙΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Σε κάθε συσκευή είναι απαραίτητο να λαμβάνουμε υπόψη μας κάποιες σημαντικές οδηγίες ασφαλείας πριν τη θέσουμε σε εφαρμογή. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί σε διαφορετική περίπτωση θέτουμε σε κίνδυνο την ίδια τη μηχανή αλλά κυρίως τους εαυτούς μας.

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες σημαντικές οδηγίες που πρέπει να τηρεί ο χρήστης της συσκευής σε όλη τη διάρκεια χρήσης της:

→η συσκευή είναι κατάλληλη για να παίρνει μετρήσεις από όλων των τύπων μηχανών.

→η συσκευή **δεν** πρέπει να χρησιμοποιείται για συνεχείς μετρήσεις καθώς και σαν συσκευή ελέγχου (alarm device).

→περιορισμοί για τη ροή των καυσαερίων:

Πίνακας 4-1: Όρια εκπομπών καυσαερίων

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ(°C)	-40 - 1000°C
O <sub>2</sub>	0 - 25vol%
CO	0 - 3000ppm
NO	0 - 3000ppm
NO <sub>2</sub>	0 - 500ppm
SO <sub>2</sub>	0 - 3000ppm
CO <sub>2</sub> (IR)	0 - 20vol%

→όταν αλλάζουμε μπαταρίες πρέπει το control unit να είναι κλειστό. Η αλλαγή των μπαταριών καλό είναι να γίνεται μέσα σε ένα λεπτό ώστε να μην χαθούν οι ρυθμίσεις για την ώρα και την ημέρα.

→οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες πρέπει να φορτίζονται σε θερμοκρασία από -10 έως 25°C. Εάν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι πλήρως αποφορτισμένες, η διάρκεια φόρτισής τους είναι 4-5 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Βέβαια δεν πρέπει να αφήνουμε τις μπαταρίες να αποφορτιστούν πλήρως. Επιβάλλεται να επαναφορτιστούν αμέσως μετά την ένδειξη χαμηλής φόρτισης.

→εάν δεν χρησιμοποιείται η συσκευή για μεγάλα διαστήματα απαιτείται αποφόρτιση και επαναφόρτιση των μπαταριών κάθε 3-4 μήνες.

→προτού ανοίξει η συσκευή πρέπει να έχουν γίνει όλες οι απαραίτητες συνδέσεις.

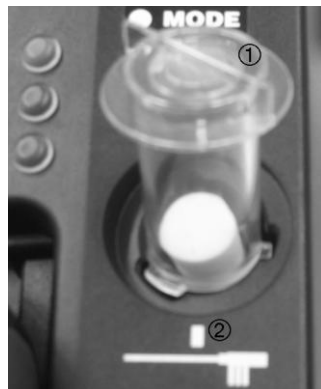
→μη αποθηκευμένες μετρήσεις χάνονται όταν κλείσει η συσκευή.



→δοχείο συμπυκνωμάτων (condensate trap/condensate container):

Το έχουμε κλειστό κατά τη διάρκεια μετρήσεων για να εμποδίσουμε τον εξωτερικό αέρα να αναρροφηθεί. Τα συμπυκνώματα αυτά αποτελούνται από μίγματα οξέων . Αποφύγετε την επαφή με το δέρμα και σιγουρευτείτε ότι τα συμπυκνώματα δεν διαρρέουν. Δεν πρέπει να αδειάζετε το δοχείο συμπυκνωμάτων όταν λειτουργεί η αντλία.

→έλεγχος του φίλτρου σωματιδίων (contamination) σε τακτικά διαστήματα(Σχήμα 4.2). Ο έλεγχος γίνεται οπτικά κοιτάζοντάς το μέσα από το προστατευτικό τζάμι. Κάνουμε αντικατάσταση αν εμφανιστούν σημάδια μόλυνσης.



Σχήμα 4.2: φίλτρο σωματιδίων

→έλεγχος για διαρροές του συστήματος:

Αυτός ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με την βοήθεια ενός καπακιού που τοποθετείται στο flue gas probe. Εισάγουμε την παράμετρο **Pump** (παροχή όγκου της ροής) και ενεργοποιούμε τη λειτουργία **Pstart** ( η οποία ενεργοποιεί την αντλία και εμφανίζει τα αποτελέσματα). Αν η ένδειξη **Pump** είναι μικρότερη από 0.1 L/min το σύστημα δεν διαρρέει. Σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα διαρρέει.

## 4.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια πρώτη επαφή με τη συγκεκριμένη συσκευή. Αναφέρονται και αναλύονται όλα τα επιμέρους εξαρτήματα της συσκευής με σκοπό ο χρήστης να μπορεί να τα αναγνωρίσει και να τα συνδέσει κατάλληλα ανάλογα με την εφαρμογή.

### 4.2.1 CONTROL UNIT

Το Control unit χρησιμοποιείται για να ελέγχει, να διαβάζει και να προγραμματίζει το Flue gas analyzer. Το control unit είναι δηλαδή ο εγκέφαλος της συσκευής γιατί με αυτό μπορεί ο χρήστης να δηλώσει ποιες παράμετροι θέλει να μετρηθούν και να εμφανιστούν στην οθόνη, στις μονάδες και τη χρονική στιγμή που θέλει.

Παρακάτω φαίνεται η μορφή του control unit καθώς και τα στοιχεία που το απαρτίζουν:

- 1: εκτυπωτής (printer)
- 2: οθόνη (display)
- 3: πληκτρολόγιο (keypad)
- 4: διασυνδέσεις (interfaces)
- 5: θέση μπαταρίας (στο πίσω μέρος)
- 6: επαφές για σύνδεση με το Flue gas analyzer
- 7: μαγνητικές υποδοχές (στο πίσω μέρος)



Σχήμα 4.3: Control Unit

Σημαντικό είναι να βρίσκεται το Control unit σε ασφαλή απόσταση από προϊόντα που μπορεί να πάθουν ζημιά από το μαγνητισμό όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, πιστωτικές κάρτες, οθόνες, βηματοδότες.

KEYPAD (πληκτρολόγιο)

Σχήμα 4.4: KEYPAD

1: πατώντας το κουμπί αυτό ο χρήστης εισέρχεται στο menu της οθόνης όπου μπορεί να αλλάξει ρυθμίσεις, να εισάγει κάποιο πρόγραμμα μέτρησης και για οτιδήποτε άλλο θέλει και του επιτρέπεται να κάνει.

2: το πλήκτρο 2 ανοίγει και κλείνει το Control unit

3: ανάβει και κλείνει το φως της οθόνης

4: καταργεί τις διαδικασίες που έχουν επιλεγεί από το χρήστη. Δηλαδή με κάθε πάτημα του κουμπιού εισέρχεται στην αμέσως προηγούμενη επιφάνεια εργασίας.

Το 'OK' έχει την ίδια χρησιμότητα που έχει το 'enter' σε ένα πληκτρολόγιο υπολογιστή.

DISPLAY (οθόνη)

Η οθόνη δείχνει διαφορετικό περιεχόμενο ανάλογα με το 'view' που είναι ενεργό εκείνη τη στιγμή. Ο όρος 'view' δηλώνει τις διάφορες επιλογές που έχει ο χρήστης προς την οθόνη.

Κάποια σύμβολα που εμφανίζονται στην οθόνη και είναι πολύ σημαντικό να τα γνωρίζει ο χρήστης γιατί τον βοηθούν να καταλάβει ποια λειτουργία είναι εν εξελίξει στη συσκευή και αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τα σύμβολα αυτά



→ προειδοποίηση για χαμηλή φόρτιση της μπαταρίας

 → το πρόγραμμα μέτρησης είναι ενεργοποιημένο

 → το πρόγραμμα μέτρησης είναι σε λειτουργία

 → η διάλυση του CO είναι σε λειτουργία

### ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΤΟΥ CONTROL UNIT

Οι μπαταρίες είτε κοινές είτε επαναφορτιζόμενες πρέπει πάντα να είναι συνδεδεμένες με το control unit γιατί διαφορετικά δεν μπορεί να υπάρξει σύνδεση με τα υπόλοιπα όργανα της συσκευής και θα χαθεί η ημερομηνία και ώρα που έχει ορισθεί.

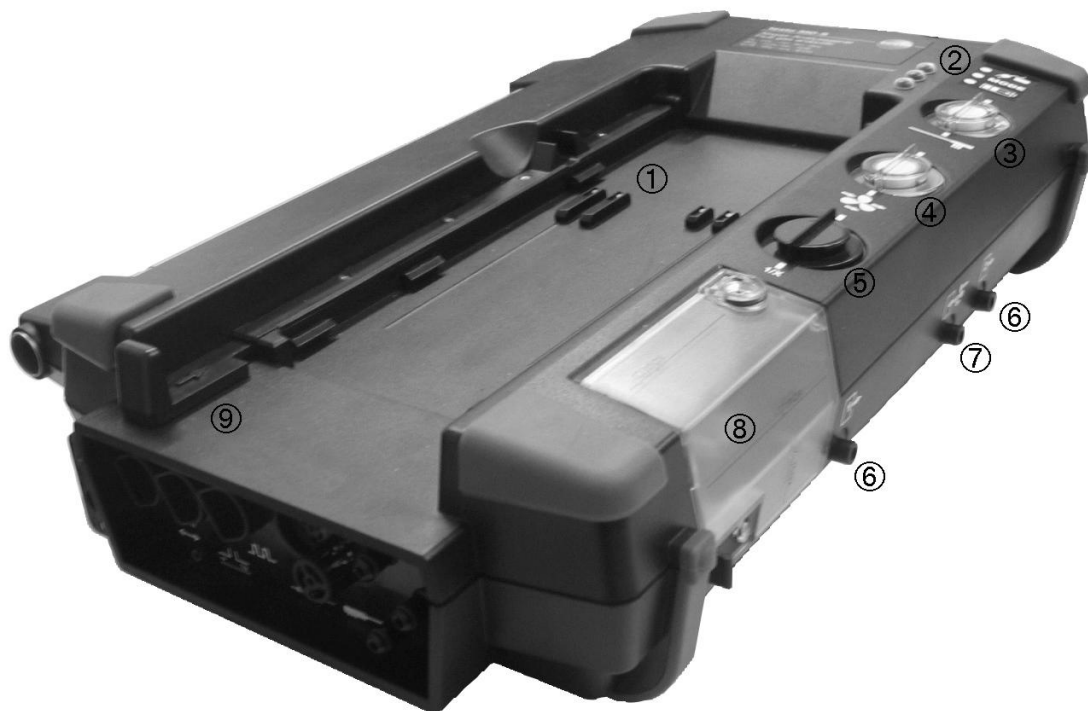
Το control unit δεν μπορεί να λειτουργήσει αν δεν είναι συνδεδεμένο με το flue gas analyzer. Θα κλείσει μόνο του μετά από 15 δευτερόλεπτα.

Χρησιμοποιούνται 4 επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (1.5V, mignon, type AA)

#### **4.2.2 FLUE GAS ANALYZER**

Το flue gas analyzer είναι το κομμάτι της συσκευής στο οποίο γίνεται η επεξεργασία και ανάλυση των καυσαερίων. Τα καυσαέρια εισάγονται στο flue gas analyzer από το flue gas probe, επεξεργάζονται, και τα τελικά αποτελέσματα παρέχονται στο control unit όπου μπορούμε να τα δούμε, να τα αποθηκεύσουμε ή να τα εκτυπώσουμε.

Μια πρώτη επαφή με το flue gas analyzer μπορούμε να αποκτήσουμε στην παρακάτω φωτογραφία στην οποία αναλύονται τα βασικά μέρη του:



Σχήμα 4.5: flue gas analyzer

- 1 → επαφές σύνδεσης με το control unit
- 2 → μικροί λαμπτήρες που δείχνουν την κατάσταση του flue gas analyzer
- 3 → φίλτρο σωματιδίων
- 4 → φίλτρο εισαγόμενου αέρα
- 5 → φίλτρο αραιώσης του CO
- 6 → έξοδος αερίων
- 7 → είσοδος φρέσκου αέρα
- 8 → παγίδα συμπυκνωμάτων (condensate trap)
- 9 → μοχλός που ξεμπλοκάρει την σύνδεση του control unit με το flue gas analyzer

#### ΛΑΜΠΤΗΡΕΣ

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τρεις λαμπτήρες LED οι οποίοι δείχνουν την κατάσταση που βρίσκεται το flue gas analyzer. Επίσης στον Πίνακα 4-2 γίνεται φανερό ποια είναι η κατάσταση του flue gas analyzer ανάλογα με το φωτισμό των λυχνιών αυτών.



Σχήμα 4.6: λαμπτήρες του flue gas analyzer

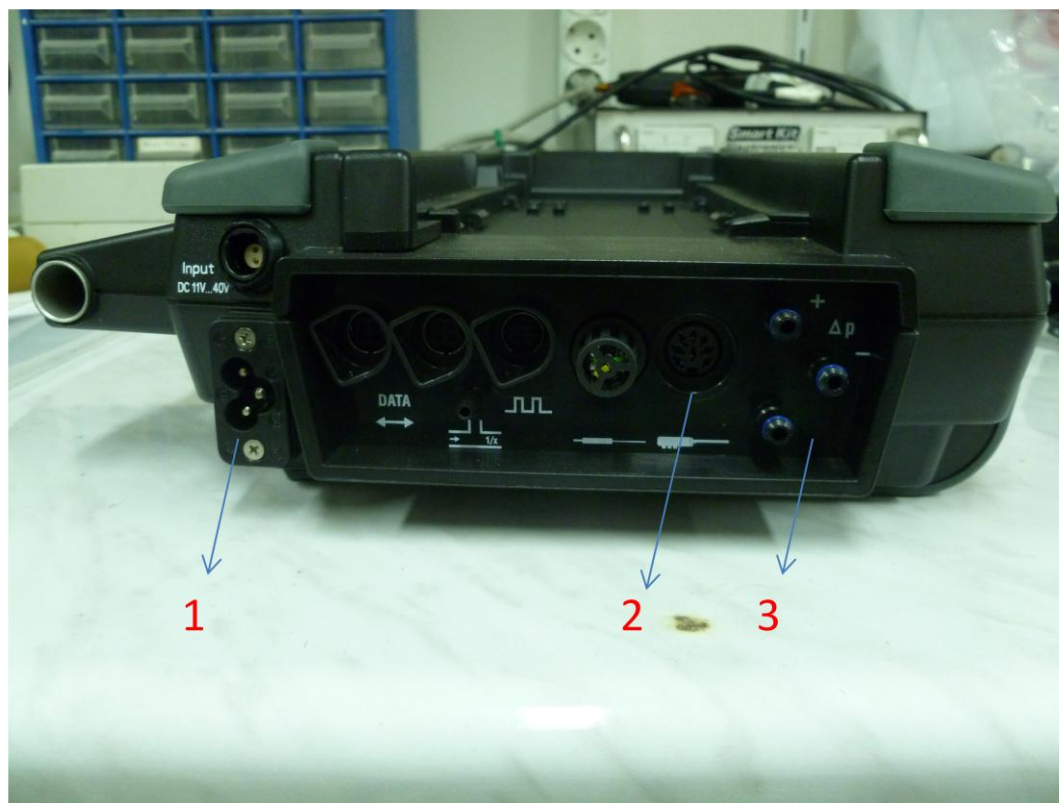
Πίνακας 4-2: κατάσταση λειτουργίας του flue gas analyzer ανάλογα με τον φωτισμό

<b>LED 1 (ΦΟΡΤΙΣΗ)</b>	
ΦΟΡΤΙΣΗ	green /steady
ΠΛΗΡΩΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ	green/flashing
ΧΑΜΗΛΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ	red/flashing
<b>LED 2</b>	
ΜΕΤΡΗΣΗ	green/steady
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΦΡΕΣΚΟΥ ΑΕΡΑ	green/flashing
ΣΦΑΛΜΑ	red/flashing
<b>LED 3(ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ)</b>	
ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	green/flashing
ΠΛΗΡΩΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ	green/steady

#### FLUE GAS ANALYZER CONNECTIONS

Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει ο χρήστης τις διάφορες συνδέσεις (connections) που μπορούν να γίνουν ανάμεσα στα δομικά όργανα της συσκευής γιατί μόνο με τις σωστές συνδέσεις μπορεί μια μέτρηση να εμφανισθεί στο control unit και να είναι σωστή.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα οι βασικές συνδέσεις με τη σημασία τους:



Σχήμα 4.7: οι επαφές του flue gas analyzer

1 → κύρια υποδοχή παροχής ρεύματος.

2 → το flue gas probe συνδέεται με το flue gas analyzer για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

3 → γίνεται σύνδεση του flue gas analyzer με το flue gas probe και μετρώνται τα καυσαέρια.

Στο Σχήμα 4.8 το flue gas analyzer είναι συνδεδεμένο κατάλληλα για να διεξαχθεί μια μέτρηση:



Σχήμα 4.8: Η σύνδεση του flue gas analyzer

### 4.2.3 FLUE GAS PROBE

Το flue gas probe είναι το όργανο εκείνο το οποίο συλλέγει μέσω ενός αισθητήρα τα καυσαέρια και τα στέλνει μέσω των ειδικών συνδέσεων του στο flue gas analyzer.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το flue gas probe με τα βασικά του τμήματα:



Σχήμα 4.9: Τα μέρη του flue gas probe



- 1→λαβή του άξονα του αισθητήρα(probe)
- 2→ο άξονας του αισθητήρα
- 3→thermocouple connector(για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων)
- 4→σύνδεση με το flue gas analyzer

### 4.3 ΟΔΗΓΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

#### 4.3.1 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ CONTROL UNIT

Το πρώτο πράγμα που χρειάζεται να γνωρίζει ο χρήστης του TESTO 350 MARITIME είναι η συνδεσμολογία των διαφόρων τμημάτων. Πρέπει δηλαδή το control unit να συνδεθεί με το flue gas analyzer μέσω των επαφών σύνδεσης, όπως επίσης και το flue gas probe με το flue gas analyzer. Αυτές οι βασικές συνδέσεις που εξετάσθηκαν και παραπάνω είναι απαραίτητο να γίνουν για να μπορέσει να λειτουργήσει η συσκευή.

Μετά τις απαραίτητες συνδέσεις είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει ο χρήστης πως θα χειριστεί το control unit. Το control unit όπως έχουμε αναφέρει ανοίγει με το κουμπί I/O (βλέπε Σχήμα 4.4). Εμφανίζεται αμέσως μετά η αρχική οθόνη όπου σκανάρεται η συσκευή για την ύπαρξη εξωτερικών τμημάτων. Η διαδικασία αυτή διαρκεί περίπου 60 δευτερόλεπτα.

Στη συνέχεια ακολουθεί η 'zeroing phase' η οποία μηδενίζει τα μετρητικά 'cells' του flue gas analyzer. Και αυτή η διαδικασία διαρκεί περίπου 60 δευτερόλεπτα. Πρέπει όμως να δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε κατά την 'zeroing phase' να μην υπάρχουν στον εισερχόμενο αέρα καυσαέρια (NO,CO) που σημαίνει ότι το flue gas probe πρέπει όταν ανοίγει η συσκευή να βρίσκεται μακριά από κάποιο burner ή έξοδο καυσαερίων. Τελικά, μετά από αυτές τις φάσεις εμφανίζονται στην οθόνη οι ρυπαντές που είναι ενεργοποιημένοι με την περιεκτικότητά τους. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι τα 'cells' είναι τα φίλτρα που έχει ο κάθε ρυπαντής. Τα 'cells' της συγκεκριμένης συσκευής είναι τα ακόλουθα: CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2-IR</sub>, O<sub>2</sub> ενώ σε άλλες εκδόσεις της συσκευής υπάρχουν και τα C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>LOW</sub>, NO<sub>LOW</sub>.

Στο main menu εμφανίζονται οι ακόλουθες επιλογές:

➤ Memory

Στο memory μπορεί ο χρήστης να διαβάσει προηγούμενες μετρήσεις(read out), να ενεργοποιήσει, να τροποποιήσει καθώς και να απενεργοποιήσει κάποιο πρόγραμμα, να διαγράψει κάποιες μετρήσεις και τέλος να ελέγξει τη ελεύθερη μνήμη(T\_FREE memory).

➤ Sensors

Εδώ γίνεται βαθμονόμηση στους αισθητήρες CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>. Αυτό είναι απαραίτητο να συμβεί όταν παρατηρούνται μη ρεαλιστικές τιμές στις μετρήσεις.

➤ Input

Στο input εισάγονται διάφορες παράμετροι όπως το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε, η θερμοκρασία και η υγρασία του περιβάλλοντος.

➤ Device

Οι επιλογές που έχει ο χρήστης είναι να αλλάξει την ημερομηνία και ώρα της συσκευής, να ελέγξει για πιθανές βλάβες και για γενικότερα να κάνει βασικές ρυθμίσεις στη συσκευή. Μία από αυτές τις ρυθμίσεις είναι και η εμφάνιση των παραμέτρων, που ενδιαφέρουν το χρήστη, στην οθόνη.

➤ Service

Υπάρχουν ειδικές ρυθμίσεις που προστατεύουν τους αισθητήρες από υπερφόρτωση. Εκεί υπάρχουν επίσης δεδομένα της συσκευής.

Πέρα όμως από τις διάφορες ρυθμίσεις που μπορεί να επιτευχθούν μέσω του main menu, το πιο σημαντικό κομμάτι που χρειάζεται να γνωρίζει κανείς είναι το πώς μπορεί να γίνει μία μέτρηση αξιοποιώντας τις λειτουργίες(functions) της συσκευής. Οι πιο σημαντικές functions που πρέπει ο χρήστης να γνωρίζει καθώς και οι λειτουργίες που επιτελούν αναλύονται παρακάτω:

- PStart, PStop → ανοίγει και κλείνει αντίστοιχα η αντλία αερίου. Αφού λοιπόν έχουμε επιλέξει τις παραμέτρους που θα εμφανίζονται, χρησιμοποιώντας το PStart μπορούμε να δούμε στην οθόνη τις τιμές των παραμέτρων αυτών με τις μονάδες τους.
- Mem. → αυτή η function αποθηκεύει τις μετρήσεις που βρίσκονται τη συγκεκριμένη στιγμή στην οθόνη με την ημερομηνία και ώρα που πραγματοποιήθηκαν.
- Start, Stop → ανοίγει και κλείνει αντίστοιχα κάποιο επιλεγμένο πρόγραμμα μέτρησης.
- Print → εκτυπώνει τις μετρήσεις που εμφανίζονται τη συγκεκριμένη στιγμή στην οθόνη με την ημερομηνία και ώρα που πραγματοποιήθηκαν.

Αυτές είναι οι απαραίτητες λειτουργίες που πρέπει ο χρήστης να γνωρίζει για να πάρει μια μέτρηση, να την αποθηκεύσει ή να την εκτυπώσει.

Οι παράμετροι που είναι δυνατόν να εμφανιστούν στην οθόνη καθώς και οι μονάδες τους είναι αρκετές. Εδώ θα αναφερθούν οι παράμετροι που υπάρχουν στη συγκεκριμένη συσκευή και είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 4-3: Όλες οι δυνατές μονάδες μέτρησης των παραμέτρων

DISPLAY	PARAMETER	UNITS
O2	οξυγόνο	%
CO	μονοξείδιο του άνθρακα	ppm,%
NO	μονοξείδιο του αζώτου	ppm,%
NO2	διοξείδιο του αζώτου	ppm,%
SO2	διοξείδιο του θείου	ppm,%
NOX	οξείδια του αζώτου	ppm,%
FT	θερμοκρασία καυσαερίων	°C, °F
AmbT	θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C, °F
CO2	διοξείδιο του άνθρακα	%
Pump	ροή αντλίας στη έξοδο	l/min
Fuel	τύπος καυσίμου	-

Η διαδικασία με την οποία επιλέγονται οι παράμετροι είναι η εξής:

Εισαγωγή στο main menu → Device → View → επιλογή παραμέτρου → Insert

### ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Στη συσκευή αυτή υπάρχει δυνατότητα εφαρμογής προεπιλεγμένων προγραμμάτων αλλά και δυνατότητα για δημιουργία νέων. Με τον όρο πρόγραμμα στη συσκευή TESTO-350 εννοείται κάποια ρύθμιση τέτοια που με την έναρξη του προγράμματος αυτού να αποθηκεύονται στη μνήμη μετρήσεις ανά συγκεκριμένο χρονικό βήμα και να σταματάνε μετά το πέρας των χρονικών βημάτων. Τα προγράμματα αυτά μπορούν ακόμη να βρίσκουν το μέσον όρο των μετρήσεων.

Για τη δημιουργία ενός προγράμματος απαιτείται να καθορισθούν μια σειρά από παραμέτρους οι οποίες είναι οι εξής:

- Εκκίνηση αυτόματα ή χειροκίνητα. Για την αυτόματη εκκίνηση του προγράμματος απαιτείται να ορισθεί η ώρα και ημερομηνία της έναρξης και λήξης του προγράμματος. Για την χειροκίνητη εκκίνηση απαιτείται το άνοιγμα της αντλίας με την λειτουργία PStart και στη συνέχεια το άνοιγμα του προγράμματος με την λειτουργία Start.
- Συνολικός χρόνος μέτρησης
- Χρονικό βήμα μετρήσεων
- Διάρκεια της φάσης ξεβγάλματος των 'cells' (rinsing phase). Κατά τη φάση ξεβγάλματος τα 'cells' του flue gas analyzer ξεβγάζονται με φρέσκο αέρα. Η διάρκεια του rinsing phase εξαρτάται από τη συγκέντρωση των καυσαερίων στο κάθε cell. Στα στοιχεία του κατασκευαστή αναφέρονται συνιστώμενες τιμές του rinsing phase ανάλογα με τη διάρκεια της μέτρησης αλλά και της συγκέντρωσης των καυσαερίων.

Συμπερασματικά, όσον αφορά τα προγράμματα μέτρησης των καυσαερίων, παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τις μεμονωμένες μετρήσεις απαιτούν όμως περισσότερο χρόνο και είναι πιο πολύπλοκες στην εφαρμογή τους. Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, η συσκευή αυτή δεν προορίζεται για συνεχείς μετρήσεις και ως συσκευή συναγερμού αλλά παρέχει μια ενδεικτική τιμή για τα καυσαέρια που παράγονται.

#### **4.3.2 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ FLUE GAS PROBE**

Όπως είχαμε αναφέρει προηγουμένως το flue gas probe πρέπει πάντα να βρίσκεται μακριά από την πηγή των καυσαερίων όταν ανοίγει ο χρήστης τη συσκευή μέχρι να τελειώσει η 'zeroing phase'. Επίσης πρέπει το probe να είναι πάντα συνδεδεμένο με το flue gas analyzer.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μετράται από το θερμοστοιχείο του flue gas probe κατά τη διάρκεια της 'zeroing phase'. Είναι σημαντικό να γίνεται έλεγχος έτσι ώστε το θερμοστοιχείο να μην ακουμπάει πουθενά όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 γιατί πολλές φορές καταλήγει το θερμοστοιχείο στην κατάσταση του Σχήμα 4.11 και χρειάζεται επανατοποθέτηση στην προηγούμενη κατάσταση.

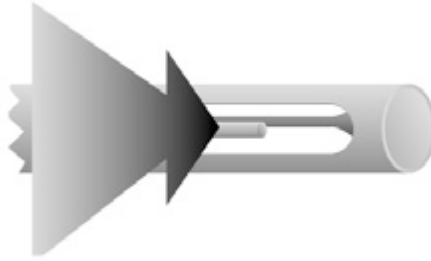


Σχήμα 4.10: Σωστή θέση του θερμοστοιχείου



Σχήμα 4.11: Λανθασμένη θέση του θερμοστοιχείου

Σε μία μέτρηση θα ήταν ιδανικό η ροή να περνάει ελεύθερα μέσα από το θερμοστοιχείο για καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Σχήμα 4.12). Ακόμη η άκρη του probe θα πρέπει να βρίσκεται στο κέντρο της ροής των καυσαερίων ή όπου θέλει ο χρήστης ανάλογα με τη μέτρηση.



Σχήμα 4.12: Η ιδανική κατεύθυνση των καυσαερίων μέσω του θερμοστοιχείου

#### 4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων εκπομπών που έγιναν στην τέταρτη μονάδα του Λαυρίου του τρίτου αεριοστροβίλου με τη βοήθεια του TESTO 350.

Τα χαρακτηριστικά του αεριοστροβίλου στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις φαίνονται παρακάτω για το μέγιστο φορτίο:

Ονομασία μοντέλου=PG9171(E)

Μέγιστη ισχύς=123.4MW

Παροχή αέρα=403kg/s

Στροφές στροβίλου=3000rpm

Θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου=539

Η συσκευή, αφού συνδέθηκε με την παροχή ρεύματος, τοποθετήθηκε κοντά στην έξοδο του στροβίλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13 :



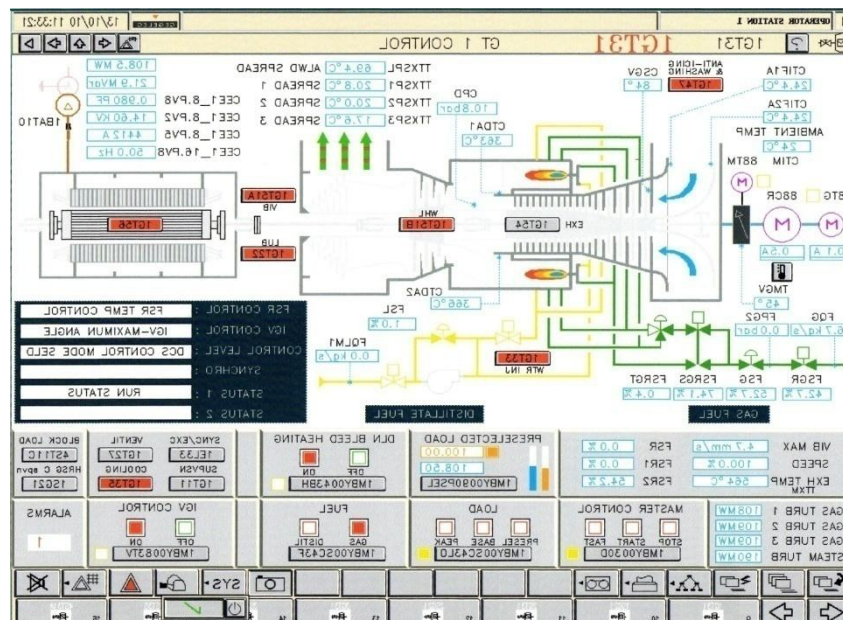
Σχήμα 4.13:τοποθέτηση του TESTO 350 στην έξοδο του στροβίλου.

Στο σημείο αυτό υπάρχει μία βάνα στο σωλήνα της οποίας τοποθετήθηκε το flue gas probe όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14: τοποθέτηση του flue gas probe για την διεξαγωγή της μέτρησης

Παράλληλα με τις μετρήσεις που έπαιρνε η συσκευή, την ίδια χρονική στιγμή συλλέγονταν δεδομένα από το δωμάτιο ελέγχου. Η οθόνη από όπου αντλήθηκαν τα θερμοδυναμικά δεδομένα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.15: οθόνη του Control Room για τα θερμοδυναμικά δεδομένα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συσκευή TESTO 350 καθώς και οι μετρήσεις των καυσαερίων από το CONTROL ROOM φαίνονται στον

Πίνακας 4-4: Μετρήσεις της περιεκτικότητας των καυσαερίων από τη συσκευή TESTO 350 και το CONTROL ROOM

ΜΕΤΡΗΣΗ	CO(ppm)		CO2(%)		NOx(ppm)		O2(%)	
	TESTO 350	CONTROL ROOM	TESTO 350	CONTROL ROOM	TESTO 350	CONTROL ROOM	TESTO 350	CONTROL ROOM
1	20	21.6	3.49	3.43	13.3	9.0	14.42	14.7
2	21	21.5	3.47	3.43	11.9	9.0	14.37	14.7
3	16	21.5	3.53	3.43	12.1	9.0	14.04	14.7
4	17	21.5	3.53	3.43	12.3	9.0	13.92	14.7
5	17	21.5	3.58	3.43	10.5	9.0	13.76	14.7
6	18	21.5	3.58	3.43	9.5	9.0	13.7	14.7
7	19	21.5	3.56	3.43	8.5	9.0	13.67	14.7
8	17	21.6	3.55	3.43	8.7	9.0	13.64	14.7
9	19	21.5	3.54	3.43	8.7	9.0	13.6	14.7

Ακόμη τα θερμοδυναμικά δεδομένα που συλλέχτηκαν στο χρόνο των 9 μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 4-5.

Πίνακας 4-5: θερμοδυναμικά δεδομένα των μετρήσεων

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ											
μέτρηση	Pamb(mbar)	CTIF1A(°C)	CTIF2A(°C)	AMB TEMP(°C)	CDP(bar)	CDTA1(°C)	CDTA2(°C)	FQG(kg/s)	EXH TEMP(°C)	CSGV*	POWER(MW)
1	1010.4	27.9	28.5	28	10.8	365	364	6.9	569	84	109.1
2	1010.4	27.6	28.4	29	10.3	361	359	6.9	567	84	109.5
3	1010.4	27.3	28	28	10.8	365	364	6.9	569	84	108.9
4	1010.4	28.2	29	29	10.4	364	365	6.7	571	77	105.7
5	1010.4	28	29.4	29	9.9	353	351	6.5	579	71	101.6
6	1010.4	28.4	29.4	29	9.7	351	248	6.4	580	69	98.5
7	1010.4	27.8	28.8	29	9.9	352	349	6.4	580	72	102.1
8	1010.4	27.8	28.8	29	10.4	359	359	6.7	571	79	106.4
9	1010.4	27.8	29.2	29	10.4	360	359	6.7	573	78	106.3

Λαμβάνοντας υπόψη τον πίνακα Πίνακας 4-4 βλέπουμε ότι μετρήσεις που παρέχει η συσκευή TESTO 350 είναι αρκετά αξιόπιστες σύμφωνα με αυτές του οργάνου της εγκατάστασης το οποίο βρισκόταν μέσα στον αγωγό εξόδου των καυσαερίων. Αντίθετα δεν υπήρχε η δυνατότητα από την εγκατάσταση να τοποθετηθεί το flue gas probe του TESTO 350 ολόκληρο μέσα στη ροή των καυσαερίων γι' αυτό δημιουργήθηκαν κάποιες αποκλίσεις. Μέσα λοιπόν όμως από αυτή τη διαδικασία πιστοποιήθηκε η συσκευή TESTO 350 και μπορούμε να πούμε ότι παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.





# 5

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΥΣΗΣ

Με τη βοήθεια ειδικών αναλυτών όπως του TESTO 350 MARITIME που αναλύθηκε προηγουμένως, μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε τα καυσαέρια των αεριοστροβίλων και να ελέγξουμε αν ξεπερνάνε τα όρια που έχουν τεθεί από τους διεθνείς κανονισμούς. Πέρα όμως από αυτό, τα καυσαέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν έμμεσα και για την διάγνωση βλαβών. Προσδιορίζοντας λοιπόν την σύνθεση του καυσαερίου και γνωρίζοντας την σύσταση του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, είναι δυνατό να εκτιμηθούν κάποια στοιχεία καύσης τα οποία θα ήταν πολύ δύσκολο να υπολογιστούν διαφορετικά. Τα μεγέθη που μπορούν να εκτιμηθούν είναι ο λόγος αέρα καύσης και ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης. Αυτά τα μεγέθη στην πορεία μπορούν να αξιολογηθούν διαγνωστικά έτσι ώστε να μπορέσουν να δώσουν μια εικόνα για το θάλαμο καύσης αλλά και για την ίδια την καύση που πραγματοποιείται. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται ο λόγος αέρα καύσης ( $\lambda_a$ ) και ο βαθμός απόδοσης του θαλάμου καύσης.

### 5.1 ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

#### 5.1.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΑΕΡΑ ΚΑΥΣΗΣ

Ο ορισμός του λόγου αέρα καύσης είναι το κλάσμα της μάζας του αέρα που συμμετέχει στην καύση προς τη μάζα του στοιχειομετρικού αέρα:

$\lambda_a = \frac{m_{air}}{m_{air,st}}$	(5-1)
--	-------

όπου  $m_{air}$  είναι η μάζα του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης ανά kg καυσίμου και  $m_{air,st}$  η μάζα αέρα που χρειάζεται για να επιτευχθεί στοιχειομετρική καύση ενός καυσίμου.

Αν εκφράσουμε τον λόγο αέρα καύσης σε μονάδες γραμμομορίων τότε η εξίσωση γίνεται:

$\lambda_{\alpha} = \frac{N_{air}}{N_{air,st}}$	(5-2)
---	-------

όπου  $N_{air}$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων αέρα ανά kg καυσίμου και  $N_{air,st}$  ο στοιχειομετρικός αριθμός των γραμμομορίων αέρα.

Η κατ' όγκο περιεκτικότητα του αέρα των καυσαερίων ( $Y_{air}$ ) δίνεται από τη σχέση:

$Y_{air,gas} = \frac{N_{air,gas}}{N_{gas}}$	(5-3)
---	-------

όπου  $N_{air,gas}$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων αέρα που υπάρχουν στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου και  $N_{gas}$  είναι ο συνολικός αριθμός γραμμομορίων των καυσαερίων που παράγονται με την καύση 1kg καυσίμου.

Ο αριθμός των γραμμομορίων αέρα που βρίσκεται στα καυσαέρια ισούται με την διαφορά του πραγματικά παραγόμενου καυσαερίου προς το στοιχειομετρικό αριθμό γραμμομορίων των καυσαερίων. Είναι δηλαδή:

$N_{air,gas} = N_{gas} - N_{gas,st}$	(5-4)
--------------------------------------	-------

όπου  $N_{gas,st}$  είναι ο στοιχειομετρικός αριθμός γραμμομορίων του καυσαερίου ανά kg καυσίμου.

Μια άλλη εξίσωση για τον αέρα των καυσαερίων είναι η εξής:

$N_{air,gas} = N_{air} - N_{air,st}$	(5-5)
--------------------------------------	-------

Η εξίσωση (5-5) δείχνει πως ο αέρας που υπάρχει στα καυσαέρια είναι ίσος με τη διαφορά του πραγματικού αέρα που συμμετέχει στην καύση με τον στοιχειομετρικό αέρα καύσης.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$Y_{air,gas} = \frac{N_{air,gas}}{N_{gas}} = \frac{N_{gas} - N_{gas,st}}{N_{gas}} = \frac{N_{air} - N_{air,st}}{N_{gas,st} + (N_{air} - N_{air,st})}$	(5-6)
---	-------

Και επειδή ισχύει

$$N_{air} - N_{air,st} = \lambda_{\alpha} * N_{air,st} - N_{air,st} = (\lambda_{\alpha} - 1) * N_{air,st} \quad (5-7)$$

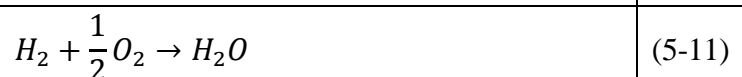
Η σχέση (5-6) γίνεται ως εξής:

$$Y_{air,gas} = \frac{(\lambda_{\alpha} - 1) * N_{air,st}}{N_{gas,st} + (\lambda_{\alpha} - 1) * N_{air,st}} \Rightarrow Y_{air,gas} = \frac{(\lambda_{\alpha} - 1)}{\lambda_{\alpha} - 1 + \frac{N_{gas,st}}{N_{air,st}}} \quad (5-8)$$

Λύνοντας ως προς το λόγο αέρα καύσης( $\lambda_{\alpha}$ ) έχουμε:

$$\lambda_{\alpha} = \frac{Y_{air,gas} * \left( \frac{N_{gas,st}}{N_{air,st}} - 1 \right) + 1}{1 - Y_{air,gas}} \quad (5-9)$$

Από τη σχέση (5-9) μπορούμε να υπολογίσουμε τον λόγο αέρα καύσης με την βοήθεια των καυσαερίων. Συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό του λόγου αέρα καύσης χρειάζεται να γνωρίζουμε την περιεκτικότητα αέρα των καυσαερίων ( $Y_{air}$ ), η οποία μπορεί να προσδιορισθεί εύκολα με τη μέτρηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας οξυγόνου στο καυσαέριο (Η συσκευή Testo 350-Maritime έχει στις βασικές της επιλογές τη μέτρηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας αέρα στα καυσαέρια). Ακόμη είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη χημική σύσταση του καυσίμου που χρησιμοποιείται στην καύση για να υπολογίσουμε τις άλλες δύο παραμέτρους, δηλαδή τον αριθμό γραμμομορίων αέρα που απαιτείται για τη στοιχειομετρική καύση ενός κιλού καυσίμου( $N_{air,st}$ ) καθώς και τον στοιχειομετρικό αριθμό γραμμομορίων του καυσαερίου ανά kg καυσίμου ( $N_{gas,st}$ ). Για τον υπολογισμό των δύο τελευταίων μεγεθών είναι απαραίτητη η χρήση των απλοποιημένων αντιδράσεων στοιχειομετρικής καύσης για 1kmol καυσίμου:



Οι παραπάνω τέσσερις αντιδράσεις μπορούν να γραφούν διαφορετικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$n = \frac{m}{M}$	(5-14)
-------------------	--------

όπου n είναι ο αριθμός γραμμομορίων, m είναι η μάζα και M το μοριακό βάρος.

Παρακάτω δίνονται τα μοριακά βάρη που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των μεγεθών που χρειάζονται για την εύρεση του λόγου αέρα καύσης:

$M_C$ : μοριακό βάρος άνθρακα (12.011 kg/kmol)

$M_{H_2}$ : μοριακό βάρος υδρογόνου (2.016 kg/kmol)

$M_S$ : μοριακό βάρος θείου (32.066 kg/kmol)

$M_{O_2}$ : μοριακό βάρος οξυγόνου (32 kg/kmol)

$M_{N_2}$ : μοριακό βάρος αζώτου (28.016 kg/kmol)

$M_{H_2O}$ : μοριακό βάρος υδρατμού (18.016 kg/kmol)

Έτσι οι παραπάνω αντιδράσεις μετασχηματίζονται στις εξής:

$12.011kgC + 32kgO_2 \rightarrow 44.011kgCO_2$	(5-15)
$2.016kgH + 16kgO_2 \rightarrow 18.016kgH_2O$	(5-16)
$32.066kgS + 32kgO_2 \rightarrow 64.066kgSO_2$	(5-17)
$14.008kgN + 32kgO_2 \rightarrow 46.008kgNO_2$	(5-18)

Η τελευταία χημική αντίδραση που οδηγεί στο σχηματισμό του  $NO_2$  χρησιμοποιεί το άζωτο που είναι συνδεδεμένο στο καύσιμο και όχι το άζωτο του ατμοσφαιρικού αέρα. Κάνουμε την παραδοχή ότι το άζωτο του αέρα δεν συμμετέχει στην καύση.

Επειδή η σύσταση του καυσίμου εκφράζεται συνήθως από την κατά μάζα περιεκτικότητα του (kg/kg καυσίμου) σε άνθρακα, υδρογόνο, θείο, οξυγόνο, νερό, άκαυστα και άζωτο, μπορούμε να υπολογίσουμε το απαιτούμενο οξυγόνο για την στοιχειομετρική καύση ενός κιλού καυσίμου από την ακόλουθη σχέση:

$m_{O_2, st} = \frac{M_{O_2}(kgO_2)}{M_C(kgC)} * c \left( \frac{kgC}{kgκαυσίμου} \right) + \frac{M_{O_2}(kgO_2)}{2 * M_{H_2}(kgH_2)} * h \left( \frac{kgH_2}{kgκαυσίμου} \right) + \frac{M_{O_2}(kgO_2)}{M_S(kgS)} * s \left( \frac{kgS}{kgκαυσίμου} \right) + \frac{M_{O_2}(kgO_2)}{M_N(kgN)} * n \left( \frac{kgN}{kgκαυσίμου} \right) - o \left( \frac{kgO}{kgκαυσίμου} \right)$	(5-19)
---	--------

Όπου

c: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα

h: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδρογόνο

s: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο

n: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άζωτο

o: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε οξυγόνο

από την προηγούμενη σχέση προκύπτει η ποσότητα σε kg του οξυγόνου που απαιτείται για την στοιχειομετρική καύση ενός kg καυσίμου.

Διαιρώντας την προηγούμενη σχέση με το μοριακό βάρος του οξυγόνου ( $M_{O_2}$ ) προκύπτει ο αριθμός γραμμομορίων του απαιτούμενου οξυγόνου για την στοιχειομετρική καύση.

$$N_{O_2,st} = \frac{c}{M_C} + \frac{h}{2 * M_{H_2}} + \frac{s}{M_S} - \frac{o}{M_{O_2}} \left( \frac{kmol O_2}{kg \text{ καυσίμου}} \right) \quad (5-20)$$

Γνωρίζουμε ακόμη ότι η κατά βάρος σύσταση του αέρα είναι 23,21%  $O_2$  και 76,79%  $N_2$ . Το μοριακό βάρος του αέρα είναι το εξής:

$$M_{air} = 0.2321 * M_{O_2} + 0.7679 * M_{N_2} = 28.94 kg/kmol \quad (5-21)$$

Επομένως ο αριθμός γραμμομορίων αέρα που απαιτείται για τη στοιχειομετρική καύση ενός κιλού καυσίμου ( $N_{air,st}$ ) υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$m_{air,st} = \frac{m_{O_2,st}}{0.2321} \Rightarrow N_{air,st} * M_{air} = \frac{N_{O_2,st} * M_{O_2}}{0.2321} \Rightarrow N_{air,st} = \frac{N_{O_2,st}}{0.2095} \quad (5-22)$$

Για τον υπολογισμό του στοιχειομετρικού αριθμού γραμμομορίων του καυσαερίου ανά kg καυσίμου ( $N_{gas,st}$ ) χρησιμοποιούμε τις χημικές εξισώσεις καύσης και έχουμε:

$$N_{gas,st} = N_{N_2,st} + \frac{c}{M_C} + \frac{h}{M_{H_2}} + \frac{s}{M_S} + \frac{w}{M_{H_2O}} + \frac{n}{M_{N_2}} \quad (5-23)$$

όπου

$N_{N_2,st}$  : ο αριθμός γραμμομορίων αζώτου στοιχειομετρικού αέρα ανά kg καυσίμου

w: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε νερό

n: η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άζωτο

Ο αριθμός γραμμομορίων αζώτου ( $N_{N_2,st}$ ) που αναλογεί στο στοιχειομετρικά απαιτούμενο αέρα δίνεται από την σχέση:

$N_{N_2,st} = 0.7905 * N_{air,st}$	(5-24)
------------------------------------	--------

Συμπερασματικά λοιπόν, γνωρίζοντας τον τύπο ή την σύσταση του καυσίμου και την περιεκτικότητα του αέρα στα καυσαέρια μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση για τον λόγο αέρα καύσης.

### **5.1.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ ΚΑΥΣΗΣ**

Ο βαθμός απόδοσης της καύσης ( $\eta_{comb}$ ) ορίζεται σαν το κλάσμα της θερμότητας που ελευθερώνεται κατά την οξείδωση του καυσίμου ( $Q_{comb}$ ) προς αυτή που θα ελευθερωνόταν αν η ίδια ποσότητα καυσίμου καιγόταν τέλεια.

Ο ακριβής υπολογισμός του βαθμού απόδοσης της καύσης απαιτεί δύσκολες μετρήσεις, γι' αυτό γίνονται κάποιες παραδοχές έτσι ώστε να εκτιμηθεί πιο εύκολα ο βαθμός απόδοσης της καύσης. Μπορούμε να πάρουμε μια εκτίμηση της πραγματικής ενέργειας που εκλύεται κατά την οξείδωση του καυσίμου αν αφαιρέσουμε από τη διαθέσιμη θερμογόνο δύναμή του, τη θερμότητα που δεν ελευθερώθηκε λόγω της ατελούς καύσης. Η θερμότητα αυτή που δεν ελευθερώθηκε μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ίση με το ενεργειακό δυναμικό του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των ακαύστων υδρογονανθράκων (UHC) που υπάρχουν στα παραγόμενα καυσαέρια. Προκύπτει λοιπόν η παρακάτω σχέση που εκτιμάει το βαθμό απόδοσης της καύσης:

$\eta_{comb} = \frac{Q_{comb}}{Q_{total}} = \frac{LHV - Q_{CO} - Q_{UHC}}{LHV}$	(5-25)
---	--------

όπου LHV είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, και  $Q_{CO}$  και  $Q_{UHC}$  το ενεργειακό δυναμικό του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των ακαύστων υδρογονανθράκων (UHC) που υπάρχουν στα παραγόμενα καυσαέρια.

Κατώτερη θερμογόνος δύναμη καυσίμου

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου συνήθως μετράται κατά την ανάλυση του καυσίμου. Στην περίπτωση όμως που δεν δίνεται η τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου, χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις που μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση για την τιμή της. Ακολουθούν δύο τέτοιες σχέσεις:

$LHV \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 34843 * c + 93868 * h + 10132 * s + 5945 * n - 10802 * o - 2449 * w$	(5-26)
--	--------

όπου c, h, s, n, o και w είναι η κατά μάζα σύνθεση του καυσίμου(kg/kg) σε C, H<sub>2</sub>, S, N, O και H<sub>2</sub>O αντίστοιχα.

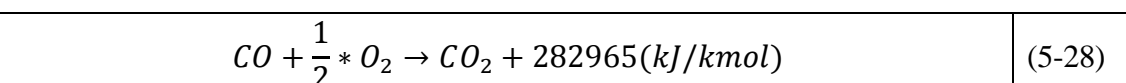
$LHV \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0.339 * c + 1.03 * h - 0.109 * (o - s) - 0.025 * w$	(5-27)
---	--------

όπου c, h, s, o και w είναι η ποσοστιαία κατά μάζα σύσταση του καυσίμου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στις εξισώσεις (5-26) και (5-27), οι συντελεστές που εμφανίζονται δεν σχετίζονται με την θερμογόνο ικανότητα των αντίστοιχων ελεύθερων στοιχείων.

Θερμότητα μονοξειδίου του άνθρακα

Όταν έχουμε πλήρη καύση υδρογονανθράκων τα μόνα προϊόντα καύσεως είναι CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>(που προέρχεται από την περίσσεια του χρησιμοποιούμενου για την καύση αέρα). Σε πραγματικές συνθήκες καύσεως σε κινητήρες είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί πλήρης καύση με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υποπροϊόντα στην καύση. Ένα από αυτά είναι και το μονοξείδιο του άνθρακα. Η ανεκμετάλλευτη θερμότητα που οφείλεται στην παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα ισούται με την συνολική ενέργεια που θα ελευθερωνόταν από την οξείδωσή του. Όπως προκύπτει από την παρακάτω σχέση για 1 kmol μονοξειδίου του άνθρακα παράγεται 282965 kJ σε μορφή θερμότητας:



Η θερμότητα λοιπόν που εκλύεται από την οξείδωση όλου του μονοξειδίου του άνθρακα είναι η εξής:

$$Q_{CO} \left( \frac{kJ}{kg \text{καυσίμου}} \right) = N_{CO,gas} * 282965 \quad (5-29)$$

όπου  $N_{CO,gas}$  είναι ο αριθμός γραμμομορίων μονοξειδίου του άνθρακα που περιέχονται στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου.

Ο υπολογισμός του αριθμού γραμμομορίων μονοξειδίου του άνθρακα που περιέχονται στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου ( $N_{CO,gas}$ ) μπορεί να γίνει εάν γνωρίζουμε, μετά από μετρήσεις την κατ' όγκο περιεκτικότητα του καυσαερίου σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Επειδή συχνά στις μετρήσεις για τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα ( $Y_{CO}$ ) χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης το ppmv (parts per million volume), ο αριθμός γραμμομορίων μονοξειδίου του άνθρακα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{CO} \left( \frac{kmolCO}{kmol \text{καυσαερίου}} \right) = 10^{-6} * Y_{CO} \quad (5-30)$$

Τελικά ο αριθμός γραμμομορίων μονοξειδίου του άνθρακα που περιέχονται στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N_{CO,gas} \left( \frac{kmolCO}{kg \text{καυσίμου}} \right) = C_{CO} * N_{gas} \quad (5-31)$$

όπου  $N_{gas}$  είναι ο αριθμός γραμμομορίων του παραγόμενου καυσαερίου ανά kg καυσίμου, ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

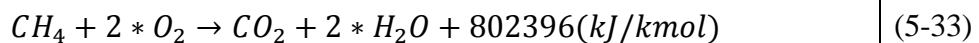
$$N_{gas} \left( \frac{kmol}{kg \text{καυσίμου}} \right) = N_{gas,st} + (\lambda_a - 1) * N_{air,st} \quad (5-32)$$

Τα μεγέθη  $\lambda_a$  (λόγος αέρα καύσης),  $N_{gas,st}$  (στοιχειομετρικός αριθμός γραμμομορίων καυσαερίων) και  $N_{air,st}$  (στοιχειομετρικός αριθμός γραμμομορίων αέρα) έχουν υπολογιστεί στην προηγούμενη ενότητα που αναφερόταν στην εκτίμηση του λόγου αέρα καύσης.

Θερμότητα ακαύστων υδρογονανθράκων



Όπως και το μονοξείδιο του άνθρακα, έτσι και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες είναι αποτέλεσμα της ατελούς καύσης. Για να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την περιεκτικότητα των άκαυστων υδρογονανθράκων ανάγουμε την περιεκτικότητα όλων των ειδών υδρογονανθράκων σε ισοδύναμο μεθανίου (UHC) και την περιεκτικότητα των πτητικών υδρογονανθράκων, επίσης, σε ισοδύναμο μεθανίου (VOC). Επειδή λοιπόν όλοι οι υδρογονάνθρακες ανάγονται στο μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση καύσης του μεθανίου για να υπολογίσουμε την ανεκμετάλλευτη θερμότητα τους. Στην επόμενη σχέση φαίνεται η εξίσωση καύσης του μεθανίου



Από την παραπάνω σχέση γίνεται φανερό ότι η θερμότητα που απελευθερώνεται από την οξείδωση ενός kmol μεθανίου είναι 802396kJ. Έτσι η συνολική απώλεια θερμότητας από τους άκαυστους υδρογονάνθρακες είναι η εξής:

$Q_{UHC}(kJ/kg\text{καυσίμου}) = N_{UHC,gas} * 802396$	(5-34)
--	--------

όπου  $N_{UHC,gas}$  είναι ο αριθμός γραμμομορίων ακαύστων υδρογονανθράκων που περιέχονται στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου. Για τον υπολογισμό του  $N_{UHC,gas}$  απαιτείται η, μέσα από μετρήσεις, κατ' όγκο περιεκτικότητα των ακαύστων υδρογονανθράκων στο καυσαέριο ( $Y_{UHC}$ ). Επειδή οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων εκφράζονται συνήθως σε ppmv, ο αριθμός γραμμομορίων ακαύστων υδρογονανθράκων ανά kmol καυσαερίου είναι:

$C_{UHC} \left( \frac{kmol\ UHC}{kmol\ \text{καυσαερίου}} \right) = 10^{-6} * Y_{UHC}$	(5-35)
--	--------

Τελικά ο αριθμός γραμμομορίων ακαύστων υδρογονανθράκων που περιέχονται στο καυσαέριο ανά kg καυσίμου δίνεται από τη σχέση:

$N_{UHC,gas} \left( \frac{kmol\ UHC}{kg\ \text{καυσίμου}} \right) = C_{UHC} * N_{gas}$	(5-36)
--	--------

όπου  $N_{gas}$  συνολικός αριθμός γραμμομορίων του καυσαερίου ανά kg καυσίμου και υπολογίζεται από την εξίσωση (5-32).



# 6

## ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτονται μια σειρά από εμπειρικές και ημιεμπειρικές σχέσεις που μπορούν να προβλέψουν την εκπεμπόμενη ποσότητα των βασικών ρυπαντών μιας θερμικής στροβιλομηχανής. Οι περισσότερες σχέσεις που αναλύονται στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται στις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου γιατί έχουν την βασικότερη επίδραση στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Ειδικά όταν χρησιμοποιείται το φυσικό αέριο σαν καύσιμο, τα οξείδια του αζώτου είναι αυτά που βρίσκονται στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Παραθέτονται ακόμη σχέσεις για την εκτίμηση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα, άκαυστων υδρογονανθράκων και καπνού.

Οι περισσότερες από αυτές τις σχέσεις που εκτιμάνε την ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας δεδομένα συγκεκριμένων μηχανών, τύπο θαλάμου καύσης, καυσίμου και συνθήκες περιβάλλοντος. Επειδή οι εκπεμπόμενοι ρύποι ενός βιομηχανικού αεριοστροβίλου ή αεροπορικού κινητήρα επηρεάζονται και από αυτούς τους παράγοντες, δίνονται πληροφορίες για τις προϋποθέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτές οι σχέσεις και αν μπορούν να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με τα πειραματικά.

### 6.1 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ NO<sub>x</sub>

Παρακάτω γίνεται αναφορά αρκετών ημιεμπειρικών σχέσεων που χρησιμοποιούνται συχνά για την εκτίμηση των οξειδίων του αζώτου καθώς και οι συνθήκες στις οποίες θα έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

#### 1.Becker

$NO_x(ppmv) = 5.73 * 10^{-6} * e^{(0.00833 * T_{flame})} * P_3^{\frac{1}{2}}$	(6-1)
---	-------

Όπου:

NO<sub>x</sub>(ppmv) : Εκπομπή NO<sub>x</sub> σε μέρη ανά εκατομμύριο, κατ' όγκο.

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας , σε Kelvin.

P<sub>3</sub> : Πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης , σε bar.

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι τα οξείδια του αζώτου εξαρτώνται από τις δύο αυτές παραμέτρους, οπότε οι συντελεστές 5.73\*10<sup>-6</sup> και 0.00833 είναι αποτέλεσμα της

εξάρτησης των NOx από τον χρόνο παραμονής και τα επίπεδα θερμοκρασίας του καυστήρα.

Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκετά ικανοποιητικά σε ονομαστικό φορτίο λειτουργίας αλλά δεν παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μερικά φορτία.

### 2.Odgers & Kretchmer

$EINO_x = 29 * e^{\left(\frac{-21.67}{T_{flame}}\right)} * P_3^{0.66} * [1 - e^{(-250*t_{form})}]$	(6-2)
--	-------

όπου

EINO<sub>x</sub> : Μάζα εκπεμπόμενου NO<sub>x</sub> ανά μάζα καιόμενου καυσίμου, gr/kg

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας, σε kelvin.

P<sub>3</sub> : Πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης, σε bar .

t<sub>form</sub> : Χρόνος σχηματισμού των NO<sub>x</sub> , σε seconds.

Από πειραματικά δεδομένα έχει προκύψει ότι η παραπάνω σχέση μπορεί να προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας αλλά όχι σε μερικά φορτία. Σύμφωνα με τους Odgers & Kretchmer ο χρόνος σχηματισμού των NO<sub>x</sub> για θαλάμους καύσης αεροπορικών κινητήρων είναι 0.8ms για ψεκαστήρες ροής αέρα και 1ms για ψεκαστήρες πίεσης. Για θαλάμους καύσης βιομηχανικών αεριοστροβίλων ο χρόνος σχηματισμού των NO<sub>x</sub> κυμαίνεται μεταξύ του 1.5-2ms. Βέβαια σε μερικές περιπτώσεις αντι του χρόνου σχηματισμού των NO<sub>x</sub> χρησιμοποιείται ο χρόνος παραμονής.

### 3.Lewis

$NO_x(ppm, as\ measured) = 3.3192 * 10^{-6} * e^{[7.9776*10^{-3}*(T_{flame}+273)]} * P_3^{0.5}$	(6-3)
---	-------

όπου:

NO<sub>x</sub>: οξείδια του αζώτου σε ppm, μετρούμενο σε συνθήκες περιβάλλοντος

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας, σε °C

P<sub>3</sub> : Πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης, σε atm.

Σε αυτή την εξίσωση η μόνη παράμετροι που χρειάζονται για τον υπολογισμό των NO<sub>x</sub> είναι η θερμοκρασία φλόγας. Η εξίσωση αυτή παρέχει ικανοποιητικά

αποτελέσματα υπό τις ίδιες συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα δηλαδή για φτωχή προαναμεμιγμένη καύση προπανίου με αέρα.

#### 4.Lefebvre

$EINOx = 4.59 * 10^{-9} * P_3^{0.25} * F * t_{res} * e^{[0.01*(T_{flame}+273)]}$	(6-4)
--	-------

όπου:

EINOx: Σε gr NOx ανά kg καυσίμου.

P<sub>3</sub>: Πίεση στο θάλαμο καύσης, σε KPa.

F: Κλάσμα αέρα που εισέρχεται στην αρχική ζώνη

t<sub>res</sub>: Χρόνος παραμονής, σε msec.

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας, σε °C

Η εξίσωση του Lefebvre μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε συμβατικούς καυστήρες γιατί από αυτούς χρησιμοποιήσε δεδομένα για την δημιουργία της.

#### 5. Leonard & Staegmaier

$NOx(ppm, 15\%O_2) = 1.6 * 10^{-6} * e^{[8*10^{-3}*(T_{flame}+273)]}$	(6-5)
---	-------

όπου:

NOx: η συγκέντρωση ανά εκατομμύριο σε συνθήκες αναφοράς οξυγόνου 15%.

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας, σε °C.

Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε περιπτώσεις καύσης προαναμεμιγμένου μίγματος και για θερμοκρασίες φλόγας μεταξύ 1430-1650°C.

#### 6.Visser & Levinsky

$NOx(ppm, 0\%O_2) = 8 * 10^{-5} * e^{[6.5*10^{-3}*(T_{flame}+273)]}$	(6-6)
--	-------

όπου:

NOx: Σωματίδια ανά εκατομμύριο, υπό συνθήκες μέτρησης ανηγμένες σε 0% οξυγόνο

T<sub>flame</sub> : Θερμοκρασία φλόγας, σε °C

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση των NOx σε συνθήκες καύσης φτωχού προαναμιγμένου μίγματος με καύσιμο φυσικό αέριο. Επειδή όμως έχουν χρησιμοποιηθεί πειραματικά δεδομένα από διάφορες πηγές, η ακρίβεια της εξίσωσης αυτής δεν είναι μεγάλη.

### 7. Doppelheuer & Lecht

$$\frac{EINOx}{EINOx,ref} = \left(\frac{P_3}{P_{3,ref}}\right)^{0.5} * \left(\frac{T_{3,ref}}{T_3}\right)^{0.5} * \left(\frac{T_{pz,ref}}{T_{pz}}\right)^{1.5} * e^{[38000 * \left(\frac{1}{T_{flame,ref}} - \frac{1}{T_{flame}}\right)]} \quad (6-7)$$

όπου:

EINOx : Μάζα οξειδίων του αζώτου σε gr / kg καιόμενου καυσίμου.

P<sub>3</sub>: Πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης , σε bar.

T<sub>3</sub>: Θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε Kelvin.

T<sub>pz</sub>: Θερμοκρασία στην αρχική ζώνη αντίδρασης (primary zone), σε Kelvin.

T<sub>flame</sub> :Θερμοκρασία φλόγας , σε Kelvin.

Τιμές ref :τιμές αναφοράς

Η σχέση αυτή αναφέρεται σε αεροπορικούς κινητήρες, αφού προέκυψε από δοκιμές που έγιναν πάνω σε αυτούς.

### 8. Deidewig & Doppelheuer

$$EINOx_F = EINOx_{SL} * \frac{e^{\left(\frac{67500}{T_{stoich}}\right)_{SL}}}{e^{\left(\frac{67500}{T_{stoich}}\right)_F}} * \frac{(P_3)_F}{(P_3)_{SL}} * \frac{m_{air,SL}}{m_{air,F}} * \frac{T_{3,SL}}{T_{3,F}} \quad (6-8)$$

όπου:

EINOx: δείκτης εκπομπών NOx , σε gr NOx/kg καιόμενου καυσίμου

T<sub>3</sub> : Θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε °C.

P<sub>3</sub> : Πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε Pa.

m<sub>air</sub>: Παροχή μάζας αέρα στο θάλαμο καύσης, σε kg/sec.

T<sub>stoich</sub>: Θερμοκρασία φλόγας για στοιχειομετρική καύση, σε Kelvin.

F : 'flight':μετρήσεις υπό συνθήκες πτήσης

SL:'Sea Level':μετρήσεις στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η σχέση χρησιμοποιείται για αεροπορικούς κινητήρες για τους οποίους διαθέτονται σε αρχεία οι δείκτες εκπομπών από τον οργανισμό ICAO για τη λειτουργία της μηχανής τόσο σε πραγματικές συνθήκες πτήσης, όσο και στην επιφάνεια της θάλασσας.

## 9. Rokke et al.

$NOx(ppm) = 18.1 * P_3^{1.42} * m_{air}^{0.3} * \varphi^{0.72}$	(6-9)
---	-------

όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε atm.

$m_{air}$ : Παροχή μάζας αέρα στο θάλαμο καύσης, σε kg/sec.

$\varphi$ : λόγος καυσίμου-αέρα

Αυτή η σχέση συσχετίζει πολύ ικανοποιητικά τις μετρήσεις των εκπομπών NOx για αεριοστροβίλους που χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο και η ισχύς τους κυμαίνεται μεταξύ 1.5-34MW.

## 10. Perkavec

Για συστήματα που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως καύσιμο και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων με ψεκασμό ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση του Perkavec:

$NOx = C * sNOx^@ * e^{\frac{T_{flame,ad} * \left(1 + \frac{P_3^{0.6} - P_{ISO}^{0.8}}{100}\right) - 2208}{247.7}} * \frac{m_{fuel}}{V_{exhDry}}$	(6-10)
---	--------

όπου:

NOx: Εκπομπές σε mg/ Nm3 ,ξηρό.

$sNOx^@$ : οι διορθωμένες εκπομπές οξειδίων(λόγω της έγχυσης του ατμού) για αδιαβατική θερμοκρασία καύσης αναφοράς, 2208°C, καθώς και για το συγκεκριμένο καιόμενο φυσικό αέριο, σε mg/ Nm3 ,ξηρό.

$P_3$ : Πίεση του αέρα κατά την καύση, σε bar.

$P_{ISO}$ : Πίεση του αέρα κατά την καύση σε συνθήκες τυπικής ατμόσφαιρας κατά ISO, σε bar.

$T_{flame,ad}$ : Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας σε πλήρες φορτίο, σε Kelvin.

$m_{fuel}$  : Παροχή μάζας καυσίμου, σε kg/sec.

$V_{exhDry}$  : Παροχή όγκου ξηρών καυσαερίων, σε m<sup>3</sup>/sec.

Η διορθωμένη τιμή  $sNOx^@$  προκύπτει από την επόμενη σχέση:

$sNOx^@ = sNOx * \left(1 - 0.3571 * \frac{m_{steam}}{m_{fuel}}\right)$	(6-11)
--	--------

Όπου το sNOx λαμβάνεται από τα δεδομένα του ICAO databank.

Η  $T_{flame,ad}$  υπολογίζεται από τον ενεργειακό ισολογισμό του θαλάμου καύσης σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$T_{flame,ad} = \frac{m_{air} * cp_{air} * T_{air} + m_{fuel} * (cp_{fuel} * T_{fuel} + LHV) + m_{steam} * cp_{steam} * T_{steam}}{m_{exhaust} * cp_{exhaust}} \quad (6-12)$	
--	--

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καύση με ψεκασμό ατμού. Σε περίπτωση έγχυσης νερού, πρέπει να ληφθεί υπόψη η θερμότητα εξατμίσεως.

Η εξίσωση (6-10) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που μεταβάλλεται η πίεση λειτουργίας του θαλάμου καύσης, ενώ η υποτιθέμενη μεταβολή του χρόνου παραμονής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Η θερμοκρασία παραμένει περίπου η ίδια με την περίπτωση για την οποία μετρήθηκε η σταθερά sNOx. Ο εκθέτης 0.6 με τον οποίο καθορίστηκε η επίδραση της πίεσης στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ισχύει για περιοχές λειτουργίας από 5 έως 12 bar.

#### 11.Rizk N.K. & Mongia H.C,

Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι ο θάλαμος καύσης αποτελείται από έναν ή περισσότερους στοιχειώδεις θαλάμους καύσης. Σε κάθε ζώνη αντίδρασης το ποσοστό σχηματισμού των NOx διαφέρει γι' αυτό για την κάθε ζώνη αντίδρασης αναπτύσσονται διαφορετικές εξισώσεις. Ακόμη στις παρακάτω εξισώσεις λαμβάνεται υπόψη η εξατμίση με ψεκασμό και η ανάμειξη στην καύση. Έτσι έχουμε:

→για τα NOx που παράγονται στην πρώτη ζώνη αντίδρασης:

- Για λόγο καυσίμου αέρα < 1.08 τότε



$NOx \left( \frac{gr}{kg} \right) = 10^{13} * \left( \frac{P_3}{1.4 * 10^6} \right)^A * e^{\left( \frac{-71442}{T_c} \right)} * (7.56 * \Phi^{-7.2} - 1.6) * t_{res}^{0.64}$	(6-13)
--	--------

- Για λόγο καυσίμου αέρα > 1.08

$NOx \left( \frac{gr}{kg} \right) = 10^{13} * \left( \frac{P_3}{1.4 * 10^6} \right)^A * e^{\left( \frac{-71442}{T_c} \right)} * (5.21 * \Phi^{-2.99} - 1.6) * t_{res}^{0.64}$	(6-14)
---	--------

→ για τα NOx που παράγονται στις επόμενες ζώνες του καυστήρα:

$NOx \left( \frac{gr}{kg} \right) = 10^{14} * \left( \frac{P_3}{1.4 * 10^6} \right)^A * e^{\left( \frac{-71442}{T_c} \right)} * (1.172 * \Phi^{-4.56} - 0.6) * t_{res}^{0.876}$	(6-15)
---	--------

Η επεξήγηση των μεγεθών είναι η εξής:

NOx : Εκπεμπόμενα οξειδία του αζώτου σε gr ανά kg καιόμενου καυσίμου.

P<sub>3</sub> : Πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε Pa.

T<sub>c</sub> : Θερμοκρασία υπό την οποία πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις καύσης, (η οποία υποτίθεται ότι είναι περίπου ίση με την θερμοκρασία φλόγας), σε Kelvin.

Φ : Λόγος ισοδυναμίας αέρα .

t<sub>res</sub> : Χρόνος παραμονής, σε msec.

A : Εκθέτης που λαμβάνει την τιμή:

$A = 11.949 * e^{\frac{-\Phi}{5.76}} - 10$	(6-16)
--	--------

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής, μπορούμε να πούμε ότι η μέθοδος δίνει ακριβέστατα αποτελέσματα σε σχέση με τα μετρούμενα, για το σύνολο της περιοχής λειτουργίας της μηχανής.

Ειδικά για θαλάμους καύσης που χρησιμοποιούν καύση πλούσιου - φτωχού μίγματος (RQL combustor) η σχέση για τα NOx στην πλούσια ζώνη είναι:

$EINOx = C_1 * \left( \frac{P_3}{C_2} \right)^{np} * t_{res,st}^{0.58} * e^{\left( \frac{np}{t_{res}} \frac{51430}{T_{flame}} \right)}$	(6-17)
---	--------

όπου:

EINOx: δείκτης εκπομπών NOx , σε gr NOx/kg καιόμενου καυσίμου

$t_{res,st}$ : ο χρόνος παραμονής για στοιχειομετρική καύση, σε ms

$C_1, C_2$ :  $2.278 \cdot 10^{10}$  και  $1.034 \cdot 10^6$  αντίστοιχα

$T_{flame}$ : Θερμοκρασία φλόγας , σε Kelvin.

$P_3$ : πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε Pa

Ο εκθέτης  $n_p$  προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_p = -116.5 * e^{\left(-\frac{\varphi}{0.222}\right)} \quad (6-18)$$

Ο εκθέτης  $n_{ip}$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{ip} = (n_{in} - 2) * \left(\frac{P_3}{C_2}\right)^{0.2} + 2 \quad (6-19)$$

όπου  $n_{in}$  είναι:

$$n_{in} = (n - 5.4) * \left(\frac{t_{res,st}}{0.2}\right)^x + 5.4 \quad (6-20)$$

όπου:

$$x = 7.66 * 10^{-5} * e^{\left(\frac{9.56}{\varphi}\right)} \quad (6-21)$$

$$n = 4.774 * \varphi^{-2.892} - 1.99 \quad (6-22)$$

Οι Rizk και Mongia ανέπτυξαν παρακάτω μια ακόμη σχέση για τις εκπομπές των NOx η οποία υπολογίζει τις συνολικές εκπομπές των NOx.

$$EINOx = \frac{5.1 * 10^{14} * (t_{res} - 0.5 * t_{evap}) * e^{\left(\frac{71100}{T_{st}}\right)}}{P_3^{0.05} * \left(\frac{\Delta P}{P_3}\right)^{0.5}} \quad (6-23)$$

όπου:

EINOx: δείκτης εκπομπών NOx , σε gr NOx/kg καιόμενου καυσίμου

$t_{res}$ : χρόνος παραμονής στην πρωτογενή ζώνη του θαλάμου καύσης σε seconds

$t_{evap}$ : χρόνος εξάτμισης του καυσίμου σε seconds

$\Delta P/P_3$  : πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης.

12. David L. Dagget, NASA

Για τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών των NOx που παράγονται μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$EINOx = 33.2 * \left( \frac{P_3}{432.7} \right)^{0.4} * e^{\frac{T_3 + 1487.27}{349.9} - 1.8796 * 10^{-4}} \quad (6-24)$$

όπου:

$P_3$ : η πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε psia.

$T_3$ : η θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε R.

Η εξίσωση αυτή αναφέρεται σε αεροπορικούς κινητήρες και πιο συγκεκριμένα σε κινητήρες της GE. Η απόκλιση που παρατηρήθηκε από την εξίσωση αυτή σε σχέση με δεδομένα από τον οργανισμό ICAO για το Boeing GE90-85B ήταν μικρότερη του 10%.

13. Zelina.

Μια ακόμα εξίσωση που έχει προκύψει από αρκετούς τύπους καυστήρων είναι η επόμενη:

$$EINOx = \frac{9.6}{\Phi_{pz}} * P_{t3}^{0.22} * t_{res,pz}^{\left(\frac{0.73}{\Phi_{pz}^{0.67}}\right)} * e^{\left(\frac{T_3}{242}\right)} \quad (6-25)$$

όπου:

$P_3$ : η πίεση εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε kPa

$\Phi_{pz}$ : λόγος αέρα καύσης στη πρωτεύουσα ζώνη αντίδρασης

$T_3$ : η θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης, σε Kelvin

$t_{res,pz}$ : ο χρόνος παραμονής στη πρωτεύουσα ζώνη αντίδρασης

Η παραπάνω σχέση ισχύει για τα εύρη:

$P_3$ : 345-1723 kPa

$T_3$ : 533-700K

$\Phi_{pz}$ : 0.72-1.18

14. Sasaki M. Kumakura H., Suzuki D.

Για θαλάμους καύσης που χρησιμοποιούν φτωχό προαναμεμιγμένο καύσιμο για την μείωση των εκπομπών των NOx, αναπτύχθηκε η παρακάτω σχέση:

$$EINOx = EINOx_{ref} * \left( \frac{P_3}{P_{3,ref}} \right)^m * e^{k*(T_3 - T_{3,ref})} \quad (6-26)$$

όπου:

$EINOx_{ref} = \alpha * \lambda_p$ , όπου  $\lambda_p$  ο λόγος αέρα καύσης στην ζώνη φτωχού μίγματος

$\alpha$ ,  $m$ ,  $k$ : σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά. Η σταθερά  $k$  παίρνει τις τιμές  $5.2 * 10^{-3} - 6.1 * 10^{-3}$  για λόγο αέρα καύσης 2- 4. Η τιμή της σταθεράς  $m$  είναι συνήθως 0.3.

### 15. General Electric

$$EINOx = 2.2 + 0.1235 * P_3^{0.4} * e^{\left(\frac{T_3}{194} - \frac{humid * 1000}{53.2}\right)} \quad (6-27)$$

όπου η πίεση μετριέται σε bar και οι συντελεστές διαμορφώνονται σύμφωνα με την μηχανή που εξετάζεται.

### 16. MTU

$$EINOx = A + B * \left(\frac{P_3}{29.83}\right)^{0.4} * e^C \quad (6-28)$$

όπου  $A=3.7$ ,  $B=26$ ,  $C=(1.8 * T_3 - 1487.27)/349.9$

### 17. AERONOX

$$EINOx = 1.5 * \left(\frac{P_3}{100}\right)^{0.6} * e^{-\frac{600}{T_4}} * t_{res}^{0.7} \quad (6-29)$$

όπου η πίεση μετράται σε kPa, η θερμοκρασία σε Kelvin και ο χρόνος παραμονής σε seconds.

### 18. SNECMA

$$EINOx = 225.013 * \left(\frac{m_{air} * T_3^{0.5}}{V_C * P_3 * e^{\frac{T_3}{230}}}\right)^{0.8219} \quad (6-30)$$

όπου:

$m_{air}$ : η παροχή αέρα σε kg/s

$V_C$ : ο όγκος του θαλάμου καύσης

$P_3$ : η πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης, σε bar

$T_3$ : η θερμοκρασία στην είσοδο του θαλάμου καύσης, σε Kelvin

19. M. Shehata

$NOx(ppm) = 2.6 * 10^{-4} * e^{(-50+3.6*T_{flame}^{0.455}-\frac{T_{flame}}{39})}$	(6-31)
---	--------

όπου:

$T_{flame}$ : η θερμοκρασία φλόγας [K]

20. Glenn, NASA

Μία ακόμα ημιεμπειρική σχέση που βρέθηκε στη βιβλιογραφία που αφορά απλούς δαχτυλοειδής θαλάμους καύσης (SAC, Simple Annular Combustor) είναι η:

$EINOx = 0.068 * P_3^5 * EXP\left(\frac{T_3 - 459.67}{345}\right) * EXP(humfact * 0.0027114)$	(6-32)
---	--------

όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (psia)

$T_3$ : Θερμοκρασία εισόδου στον θάλαμο καύσης (°R)

humfact: παράγοντας υγρασίας

Για θαλάμους καύσης τεχνολογίας DAC(Dual Annular Combustor) έχει προταθεί η ακόλουθη σχέση:

$EINOx = 3.9 * P_3^{0.37} * EXP\left(\frac{T_3 - 459.67}{349.9}\right) * EXP(humfact * 0.002114) * \frac{FAR}{delphi}$	(6-33)
--	--------

όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (psia)

$T_3$ : Θερμοκρασία εισόδου στον θάλαμο καύσης (°R)

FAR: λόγος καυσίμου αέρα

delphi=μεταβλητή που προσαρμόζει τον FAR για διάφορα συστήματα ψύξης

Για θαλάμους τύπου LPP(Lean Premixed Prevarporized combustion) προτάθηκε η σχέση:

$EINOx = 0.0000758 * (P_3 * 6.8948)^{0.75} * \sqrt{\left(\frac{0.0075 * T_3}{T_4}\right)}$	(6-34)
--	--------

Όπου η πίεση μετριέται σε psia και η θερμοκρασία σε °Rankine.

### 21. Joachim Kurzke

Μια εμπειρική σχέση που χρησιμοποιείται στο λογισμικό GASTURB για την εκτίμηση των εκπομπών είναι η ακόλουθη:

$S_{NOx} = \left(\frac{P_3}{2965kPa}\right)^{0.4} * e^{\left(\frac{T_3 - 826K}{194K} + \frac{6.29 - 100 * war}{53.2}\right)}$	(6-35)
---	--------

war: water to air ratio

T<sub>3</sub>: Θερμοκρασία εισόδου στον θάλαμο καύσης (K)

P<sub>3</sub>: Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (kPa)

Συνεπώς ο δείκτης εκπομπών (g/kg) των NO<sub>x</sub> είναι:

→ Για συμβατικού τύπου θαλάμους καύσης

$EINOx = 32 * S_{NOx}$	(6-36)
------------------------	--------

→ Για διπλούς δαχτυλοειδείς θαλάμους καύσης

$EINOx = 23 * S_{NOx}$	(6-37)
------------------------	--------

### 22. Wey

Ο Wey ανέπτυξε δύο ακόμη σχέσεις για τα οξείδια του αζώτου :

$EINOx = 1.31 * e^{\frac{T_3}{194}} * FAR^{1.69} * P_3^{0.594} * \left[\frac{\Delta P}{P_3}\right]^{-0.565}$	(6-38)
--	--------

$EINOx = 3.35 * e^{\frac{T_3}{194}} * FAR^{2.13} * P_3^{0.594} * \left[\frac{\Delta P}{P_3}\right]^{-0.565}$	(6-39)
--	--------

Όπου:

P<sub>3</sub> : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (kPa)

ΔP: Πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης

T<sub>3</sub> : Θερμοκρασία πρωτεύουσας ζώνης (Kelvin)

FAR: λόγος καυσίμου αέρα.

23. Nicolas Antoine

Η παρακάτω σχέση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των εκπομπών αζώτου για στροβιλομηχανές νέας γενιάς με χαρακτηριστικό τον διπλό δακτυλοειδή σε σειρά θάλαμο καύσης (DAC).

$EINOx = 0.004194 * T_4 * \left(\frac{P_3}{439}\right)^{0.37} * e^{\frac{T_3-1471}{345}}$	(6-40)
---	--------

όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (psia)

$T_3$  : Θερμοκρασία στην είσοδο του θαλάμου καύσης(°Rankine)

$T_4$  : Θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης(°Rankine)

24. LDI

Παρακάτω αναπτύσσονται δύο ακόμη ημιεμπειρικές σχέσεις παρόμοιες με του Wey:

$EINOx = 0.104 * e^{\frac{T_3}{185}} * FAR^{1.32} * P_3^{0.68} * \left[\frac{\Delta P}{P_3}\right]^{-0.36}$	(6-41)
---	--------

$EINOx = 1.359 * e^{\frac{T_3}{194}} * FAR^{1.69} * P_3^{1.69} * \left[\frac{\Delta P}{P_3}\right]^{-0.565}$	(6-42)
--	--------

Όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης (kPa)

$\Delta P$ : Πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης

$T_3$  : Θερμοκρασία πρωτεύουσας ζώνης (Kelvin)

FAR: λόγος καυσίμου αέρα.

25. GTAC

Στην προσπάθεια να εκτιμηθούν οι εκπομπές των NOx σε μηχανές νέας γενιάς όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, οι Κ. Μαθιουδάκης, Ν. Αρετάκης, Α. Αλεξίου και Ι. Ρουμελιώτης έκαναν μία δημοσίευση στην οποία αναφέρονται μεταξύ άλλων, δύο μέθοδοι εκτίμησης των NOx για μηχανές με λόγο παράκαμψης μεγαλύτερο του 10(GTAC, Geared Turbofan with Active Core technologies).

Η πρώτη μέθοδος εκτίμησης βασίζεται στην υπόθεση ότι αυτές οι μηχανές διαθέτουν την ίδια τεχνολογία θαλάμου καύσης με τις μηχανές(base) στις οποίες υπάρχουν δεδομένα από το ICAO(δηλαδή δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές των NOx, την P3 και την T3). Η σχέση που προκύπτει για τις GTAC εκπομπές των NOx είναι η εξής:

$$EINOx_{GTAC} = EINOx_{BASE}(T_{3,GTAC}) * \left[ \frac{P_{3,GTAC}(T_{3,GTAC})}{P_{3,BASE}(T_{3,GTAC})} \right]^{0.5} \quad (6-43)$$

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί ημιεμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για θαλάμους καύσης νέας τεχνολογίας για τον υπολογισμό των NOx.

Η πρώτη σχέση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των εκπομπών NOx για την νέα γενιά των στροβιλομηχανών για διπλό δακτυλοειδή θάλαμο καύσης η οποία προτάθηκε από τους Antoine, N. and Kroo, I., είναι η ακόλουθη:

$$EINOx = 0.0075492 * T_4 * \left( \frac{P_3}{30.267985} \right)^{0.37} * e^{\frac{1.8 * T_3 - 1471}{345}} \quad (6-44)$$

Στην παραπάνω εξίσωση αυτό που χρειάζεται να γνωρίζουμε είναι η θερμοκρασία και η πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης και η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης.

Μια δεύτερη σχέση που χρησιμοποιείται για χαμηλές εκπομπές NOx, προτάθηκε από τους Lee, C., Tacina, K., Wey, C. και είναι η εξίσωση (6-41) η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως.

## 26. LTT

$$EINOx = P_3^{0.5} * e^{(T_3/300)} * FAR \quad (6-45)$$

## 6.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ CO

Για τον υπολογισμό των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα(CO) σε αεριοστροβίλους ή αεροπορικούς κινητήρες χρησιμοποιούνται αρκετές σχέσεις, συνήθως ημιεμπειρικές οι οποίες παραθέτονται παρακάτω:



Lefebvre

$EICO = 0.333 * 10^{10} * \frac{e^{(-0.00275 * T_{pz})}}{F * P_3^{1.5} * (t_{res} - 0.55 * t_{evap}) * \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^{0.5}}$	(6-46)
--	--------

όπου:

CO: Γραμμάρια εκπεμπόμενου μονοξειδίου του άνθρακα ανά κιλό καιόμενου καυσίμου(gr/kg).

$T_{pz}$ : Θερμοκρασία στην αρχική ζώνη καύσης, σε Kelvin.

F: Κλάσμα του αέρα καύσης που προσάγεται στην αρχική ζώνη αντίδρασης .

$P_3$ : Πίεση μίγματος καύσης, κατά την είσοδό του στο θάλαμο, σε Pa.

$T_{evap}$ : Χρόνος εξάτμισης, σε msec.

$T_{res}$ : Χρόνος παραμονής, σε msec.

$\Delta P_3/P_3$ : Αδιάστατη πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με καλή ακρίβεια όταν οι εκπομπές του CO είναι χαμηλές.

Σε περίπτωση που κάποια χαρακτηριστικά του θαλάμου καύσης στην πρωτεύουσα ζώνη αντίδρασης είναι γνωστά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εξίσωση:

$EICO = 86 * \frac{m_{pz} * T_{pz} * e^{-0.00345 * T_{pz}}}{(V_c - V_e) * \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^{0.5} * P_3}$	(6-47)
---	--------

όπου:

$m_{pz}$ : η παροχή στην πρωτεύουσα ζώνη σε kg/s

$T_{pz}$ : θερμοκρασία στην πρωτεύουσα ζώνη σε Kelvin.

$P_3$ : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης, σε Pa.

$V_c$ : ο όγκος του θαλάμου καύσης

Το  $V_e$  υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$V_e = \frac{0.55 * m_{pz} * D^2}{\rho_{pz} * \lambda_{eff}}$	(6-48)
---	--------

όπου:

D: η μέση διάμετρος Sauter.

$\rho_{pz}$ : η πυκνότητα του καυσαερίου στην πρωτεύουσα ζώνη αντίδρασης.

$\lambda_{\text{eff}} = d^2/t_{\text{evap}}$ . Το μέγεθος  $d$  είναι η αρχική διάμετρος της σταγόνας, και  $t_{\text{evap}}$  ο χρόνος εξάτμισης.

### Doppelheuer & Lecht

$EICO = f * \left( \frac{m_{\text{air}}}{P_3^{1.8} * e^{\left(\frac{T_3}{300}\right)}} \right) * \left( \frac{T_3}{T_{3,\text{ref}}} * \frac{P_{3,\text{ref}}}{P_3} \right)^C$	(6-49)
--	--------

όπου:

$m_{\text{air}}$ : Παροχή αέρα.

$P_3$ : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης, σε bar.

$T_3$ : Θερμοκρασία πρωτεύουσας ζώνης, σε Kelvin.

$P_{3,\text{ref}}$ : Πίεση κατά την είσοδο στο θάλαμο καύσης σε συνθήκες αναφοράς, σε bar.

$T_{3,\text{ref}}$ : Θερμοκρασία κατά την είσοδο στο θάλαμο καύσης σε συνθήκες αναφοράς, σε Kelvin.

Η συνάρτηση  $f$  και ο εκθέτης  $C$  προσδιορίζονται από τα πειράματα. (γι' αυτό χρειάζονται τα πειραματικά δεδομένα για την εύρεση των σταθερών αυτών). Από τους Doppelheuer & Lecht η τιμή της σταθεράς  $C$  είναι 0.4.

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται σε αεροπορικούς κινητήρες.

### Rizk & Mongia

$EICO = 0.18 * 10^9 * \frac{e^{\left(\frac{7800}{T_{pz}}\right)}}{P_3^2 * (t_{\text{res}} - 0.4 * t_{\text{evap}}) * \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^{0.5}}$	(6-50)
--	--------

Η εξίσωση αυτή είναι παρόμοια με την εξίσωση του Lefebvre (εξίσωση (6-46)). Αυτή η εξίσωση δεν δίνει τόση έμφαση στη θερμοκρασία αλλά στην πίεση του θαλάμου καύσης στην πρωτεύουσα ζώνη.

## 6.3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΚΑΥΣΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

### Lefebvre

Η σχέση που προτείνει ο Lefebvre για τους άκαυστους υδρογονάνθρακες είναι παρόμοια με την αντίστοιχη σχέση για το μονοξείδιο του άνθρακα (εξίσωση (6-46)).

$$EIUHC = 0.216 * 10^{10} * \frac{e^{(-0.00345 * T_{pz})}}{F * P_3^{1.5} * (t_{res} - 0.55 * t_{evap}) * \frac{\Delta P_3}{P_3}} \quad (6-51)$$

όπου:

EIUHC: Γραμμάρια εκπεμπόμενων ακαύστων υδρογονανθράκων ανά κιλό καίόμενου καυσίμου(gr/kg).

$T_{pz}$ : Θερμοκρασία στην αρχική ζώνη καύσης, σε Kelvin.

F: Κλάσμα του αέρα καύσης που προσάγεται στην αρχική ζώνη αντίδρασης .

$P_3$ : Πίεση μίγματος καύσης, κατά την είσοδό του στο θάλαμο, σε Pa.

$T_{evap}$ : Χρόνος εξάτμισης, σε msec

Η παραπάνω εξίσωση βγάζει ακριβέστερα αποτελέσματα στην περίπτωση που γνωρίζουμε πως οι εκπομπές των ακαύστων υδρογονανθράκων είναι χαμηλές.

Rizk & Mongia

Την παραπάνω εξίσωση υιοθέτησαν οι Rizk & Mongia και την τροποποίησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$EIUHC = 0.755 * 10^{11} * \frac{e^{\left(\frac{9756}{T_{pz}}\right)}}{P_3^{2.3} * (t_{res})^{0.1} * \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^{0.6}} \quad (6-52)$$

Doppelheuer & Lecht

Ο υπολογισμός των ακαύστων υδρογονανθράκων γίνεται σύμφωνα με τους Doppelheuer & Lecht όπως του μονοξειδίου του άνθρακα με την παρακάτω σχέση μιας και τα δύο μεγέθη εξαρτώνται από τις ίδιες παραμέτρους.

$$EICO = f * \left( \frac{m_{air}}{P_3^{1.8} * e^{\left(\frac{T_3}{300}\right)}} \right) * \left( \frac{T_3}{T_{3,ref}} * \frac{P_{3,ref}}{P_3} \right)^c \quad (6-53)$$

όπου η συνάρτηση f και η σταθερά C υπολογίζονται με τη βοήθεια πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται σε αεροπορικούς κινητήρες.

## 6.4 ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΠΝΟΥ

### Doppelheuer & Lecht

Για τον υπολογισμό του καπνού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση των Doppelheuer & Lecht:

$C_{soot} = C_{soot,ref} * \left(\frac{\varphi}{\varphi_{ref}}\right)^{2.5} * \left(\frac{P_3}{P_{3,ref}}\right)^{1.35} * \frac{e^{\frac{-20000}{T_{flame}}}}{e^{\frac{-20000}{T_{flame,ref}}}}$	(6-54)
--	--------

όπου:

$C_{soot}$  : Συγκέντρωση εκπεμπόμενης αιθάλης σε mgr / m<sup>3</sup>

$\varphi$ : λόγος ισοδυναμίας καυσίμου

$P_3$ : Πίεση μίγματος καύσης, κατά την είσοδό του στο θάλαμο, σε bar.

$T_{flame}$ : η θερμοκρασία φλόγας, σε Kelvin

ο δείκτης ref αναφέρεται σε συνθήκες αναφοράς. Η πίεση, η θερμοκρασία και ο λόγος καυσίμου-αέρα στις συνθήκες αναφοράς μπορούν να βρεθούν από την τράπεζα δεδομένων του ICAO. Η σχέση αυτή εφαρμόζεται σε αεροπορικούς κινητήρες.

## 6.5 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Στα τέλη του 1989 σε απάντηση της Σουηδίας που επέβαλε φόρο στις ολικές εκπομπές UHC και NOx, οι αερογραμμές άρχισαν να ζητούν πληροφορίες για στοιχεία που αφορούσαν ολόκληρη την πτήση. Αυτές οι πληροφορίες απαιτούσαν λεπτομερής υπολογισμούς των εκπομπών και τη συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών του κινητήρα με αυτούς του υπόλοιπου αεροσκάφους. Λόγω αυτών των φόρων και των κανονισμών του ICAO, άρχισε το ενδιαφέρον για τον υπολογισμό των εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης. Η υπάρχουσα μεθοδολογία ήταν σύνθετη και δύσκολα εφαρμόσιμη. Για να διευκολύνουν τους υπολογισμούς χρειαζόνταν μια σχετικά πιο εύχρηστη και ακριβή μεθοδολογία που να χρησιμοποιεί άμεσα τις διαθέσιμες πληροφορίες.

### T3-P3 METHOD

Οι Sarli et al. το 1975 και οι Blazowski et al. το 1973 ανέπτυξαν την επονομαζόμενη «**T3-P3 Method**» η οποία υπολογίζει της εκπομπές HC, CO, και NOx.

Η μέθοδος αυτή έχει προταθεί για αεροπορικούς κινητήρες με δαχτυλοειδή θάλαμο καύσης.

Περιγραφή της Μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος συνδέει τις εκπομπές σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας με τις εκπομπές στο επίπεδο θαλάσσης με βάση τη θερμοκρασία εισόδου  $T_3$  και την πίεση εισόδου  $P_3$  στον θάλαμο καύσης. Για να εφαρμοσθεί η μέθοδος χρειάζονται τα ακόλουθα στοιχεία:

- 1) τα επίπεδα εκπομπών σε επίπεδο θαλάσσης για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται συνήθως η βάση δεδομένων ICAO
- 2) τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου της μηχανής

Από τα δεδομένα που έχουμε στο επίπεδο της θάλασσας προσδιορίζονται οι σχέσεις:

$EI-T_3$  και  $P_3-T_3$ .

Στη συνέχεια με βάση τις παραπάνω σχέσεις προσδιορίζεται αρχικά για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας (τιμές  $P_3$ ,  $T_3$ ) η θερμοκρασία  $T_3$  σε επίπεδο θαλάσσης και στη συνέχεια από τη σχέση  $EI-T_3$  οι εκπομπές καυσαερίων. Για τον υπολογισμό όμως των εκπομπών σε διαφορετικά υψόμετρα κάνουμε τις παρακάτω μετατροπές:

$EI(CO, UHC) = EI_{sl} * \left(\frac{P_{3sl}}{P_3}\right)^x$	(6-55)
$EINOx = EI_{sl} * \left(\frac{P_3}{P_{3sl}}\right)^y * e^H$	(6-56)
$EICO_2 = 3152 * 1.5714 * EICO * 3.152 * EIUHC$	(6-57)
$EIH_2O = 1290.7 - 1290.7 * EIUHC$	(6-58)

όπου:

$P_3$  : Πίεση εισόδου στον θάλαμο καύσης

$T_3$ : Θερμοκρασία εισόδου στον θάλαμο καύσης

sl: δείκτης που δηλώνει πως οι εκπομπές αναφέρονται στο επίπεδο θαλάσσης.

$e^H$ : διορθωτικός συντελεστής υγρασίας.

$H = -19 * (SH - 0.0063)$	(6-59)
---------------------------	--------

SH: η ειδική υγρασία σε ένα συγκεκριμένο ύψος αντίστοιχο με το 60% της σχετικής υγρασίας

Ο εκθέτης  $\gamma$  της εμπειρικής σχέσης των NO<sub>x</sub> κυμαίνεται από 0.37 έως 0.6. Όσον αφορά στον εκθέτη  $x$  σύμφωνα με μελέτες που έγιναν από τον Lyons et al το 1979 υπολόγισαν τον εκθέτη  $x$  ίσο με 1.5 για τον EICO και ίσο με 2.5 για τον EIHC. Παρ' όλα αυτά οι Donovan(1977) και Sarli (1975) παρατήρησαν ότι ο εκθέτης  $x$  ισούται με τη μονάδα.

### **BOEING FUEL FLOW METHOD 1**

Ο Baughcum το 1994 βασιζόμενος στην T3-P3 Method ανέπτυξε την Boeing Fuel Flow Method 1 (BFFM1). Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται τη συσχέτιση των εκπομπών καυσαερίων με την παροχή καυσίμου.

Οι αεροπορικές εταιρίες έδειξαν προτίμηση σε ημι-εμπειρικές σχέσεις βασισμένες στη ροή καυσίμου γιατί η παροχή καυσίμου ήταν διαθέσιμη από τον ICAO για κάθε τμήμα της πτήσης. Επομένως, ένας υπολογισμός που συσχέτιζε τις εκπομπές σε σχέση με τη ροή καυσίμου ήταν μία ελκυστική εναλλακτική διαδικασία σε σχέση με την υπάρχουσα.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται μόνο σε υποηχητικές πτήσεις σε πολιτικά αεροσκάφη και όχι σε στρατιωτικά.

#### Περιγραφή της Μεθόδου

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί τον παράγοντα ροής καυσίμου  $W_{ff}$  που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$W_{ff} = \frac{W_f}{\theta_{amb}^{1.5}}$	(6-60)
---	--------

Με βάση τον παράγοντα ροής καυσίμου  $W_{ff}$  υπολογίζονται τα επίπεδα εκπομπών καυσαερίων σε επίπεδο θαλάσσης (REINO<sub>x</sub>, REICO, REIHC) από τις διαθέσιμες μετρήσεις. Για διαφορετικό υψόμετρο οι συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν και τα επίπεδα εκπομπών εκτιμούνται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$EINOx_{alt} = REINOx * \theta_{amb} * e^H$	(6-61)
---	--------

$EI(CO, UHC)_{alt} = \frac{REI(CO, UHC)}{\delta_{amb}^4}$	(6-62)
---	--------

όπου:

$$\theta_{amb} = T_{amb} / 288.15$$

$T_{amb}$ : Θερμοκρασία αναφοράς σε Kelvin

$$\delta_{amb} = P_{amb} / 14.696$$

$P_{amb}$ : Πίεση αναφοράς σε psia

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν λαμβάνονται υπόψη οι απομαστεύσεις, οι οποίες επηρεάζουν την παροχή καυσίμου για δεδομένη ώση.

### **BOEING FUEL FLOW METHOD 2**

Η Boeing Fuel Flow Method 2 (BFFM 2) αναπτύχθηκε το 1994 από τον Martin R.L. et al και μετά από δύο χρόνια από τον Baughum et al. Το ιστορικό αυτής της μεθόδου ακολουθεί αυτό της BFFM1. Στις 6 Μαρτίου το 1995 ο Richard L.Martin και οι συνεργάτες του προβαίνουν σε μία δημοσίευση που για πρώτη φορά γινόταν αναφορά στη συγκεκριμένη μέθοδο. Αποτελεί σήμερα μία από τις πιο διαδεδομένες και εύχρηστες μεθόδους και χρησιμοποιείται συχνά σε αναφορές και δημοσιεύσεις.

Η BFFM 2 είναι μία επέκταση της παλιάς μεθόδου η οποία ήταν κατάλληλη για συγκεκριμένες συνθήκες ημέρας. Η Boeing 2 χρησιμοποιείται για διάφορες θερμοκρασίες και μεγαλύτερα ύψη.

#### Περιγραφή της μεθόδου

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο έτσι κι εδώ χρησιμοποιούμε την βιβλιοθήκη του ICAO για να προμηθευτούμε πληροφορίες όσον αφορά τη ροή καυσίμου, τις εκπομπές υδρογονανθράκων, μονοξειδίων του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου και για τα 4 επίπεδα πτήσης (TAKE OFF, CLIMB, APPROACH, IDLE).

Σχεδιάζουμε το λογαριθμικό διάγραμμα των EI με την ροή του καυσίμου. Από τη συγκεκριμένη γραφική παράσταση παρατηρούμε πως μεταβάλλονται οι εκπομπές REI(CO,UHC,NOx) για διάφορες ροές καυσίμου.

Στις γραφικές παραστάσεις των HC και CO εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Κάποιες ωστόσο μηχανές μπορεί να μην βγάζουν τόσο καλές τιμές ώστε να είναι εύκολη η προσέγγισή τους γι αυτό και πρέπει να γίνονται και οι κατάλληλες, κάθε φορά, διορθώσεις.

Όσον αφορά την καμπύλη των NOx είναι μία γραμμική συνάρτηση από σημείο σε σημείο σε λογαριθμικό χαρτί.

Ο παράγοντας ροής καυσίμου (fuel flow factor) είναι:

$W_{ff} = \frac{W_f}{\delta_{amb}} * \theta_{amb}^{3.8} * e^{0.2 * M^2}$	(6-63)
--	--------

όπου:

M: αριθμός Mach

$\theta_{amb} = T_{amb} / 288.15$

$T_{amb}$ : Θερμοκρασία αναφοράς σε Kelvin

$\delta_{amb} = P_{amb} / 14.696$

$P_{amb}$ : Πίεση αναφοράς σε psia

Έτσι μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των καινούριων δεικτών εκπομπών EI ως εξής:

$EI(CO, UHC) = REI(CO, UHC) * \frac{\theta_{amb}^{3.3}}{\delta_{amb}^{1.02}}$	(6-64)
$EINOx = REINOx * e^H * \left( \frac{\theta_{amb}^{3.3}}{\delta_{amb}^{1.02}} \right)^{0.5}$	(6-65)

όπου:

H υγρασία υπολογίζεται από την εξίσωση (6-59)

Και η ειδική υγρασία(SH: specific humidity):

$SH = \frac{0.62198 * RH * PV}{P_{amb} - RH * PV}$	(6-66)
--	--------

όπου:

RH(relative humidity): σχετική υγρασία.

PV: πίεση ατμού κορεσμού (psia) και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$P_u = 0.014504 * 10^\beta$	(6-67)
-----------------------------	--------

όπου β: σχετική υγρασία η οποία υπολογίζεται:

$\begin{aligned} \beta = & 7.90298 * \left( 1 - \frac{373.16}{T_{amb}} \right) + 3.00571 + 5.02808 \log \left( \frac{373.16}{T_{amb}} \right) \\ & + 1.3816 * 10^{-7} * \left[ 1 - 10^{11.344 \left( 1 - \frac{373.16}{T_{amb}} \right)} \right] + 8.1328 * 10^{-3} \\ & * \left[ 10^{3.49149 * \left( 1 - \frac{373.16}{T_{amb}} \right)} - 1 \right] \end{aligned}$	(6-68)
---	--------



**DLR FUEL FLOW METHOD**

Η DLR Method αναπτύχθηκε από τους Lecht M., Deidewig F. το 1994 τον Deidewig et al. το 1996 και τον Shulte et al. το 1997. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει πάρα πολλές ομοιότητες με την BFFM2. Διαφέρουν κυρίως σε διορθώσεις που γίνονται στην ροή του καυσίμου και στον EINOx.

Περιγραφή της μεθόδου

Υπολογίζουμε αρχικά την ανηγμένη θερμοκρασία και πίεση στην είσοδο της μηχανής:

$\theta_{amb} = \frac{T_{amb}}{288.15}$	(6-69)
---	--------

$\delta_{amb} = \frac{P_{amb}}{101.3kPa}$	(6-70)
---	--------

Όπου η  $T_{amb}$  και  $P_{amb}$  είναι η ολική θερμοκρασία και πίεση αντίστοιχα και υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$T_{amb} = T * (1 + 0.2 * Mach^2)$	(6-71)
------------------------------------	--------

$P_{amb} = P * (1 + 0.2 * Mach^2)^{3.5}$	(6-72)
--	--------

όπου:

T,P: η στατική θερμοκρασία και πίεση στην είσοδο της μηχανής.

Στη συνέχεια γίνεται η διόρθωση της ροής του καυσίμου με την ακόλουθη σχέση:

$CorrectedFuelFlow = \frac{FuelFlow}{\delta_{amb} * \sqrt{\theta_{amb}}}$	(6-73)
---	--------

Ο δείκτης εκπομπών αναφοράς EINOx,ref λαμβάνεται από την τράπεζα δεδομένων του ICAO χρησιμοποιώντας την διορθωμένη ροή του καυσίμου. Έτσι προκύπτει ο δείκτης εκπομπών από την παρακάτω σχέση:

$EINOx = EINOx,ref * \delta_{amb}^A * \theta_{amb}^B$	(6-74)
---	--------

Οι εκθέτες A και B προσδιορίζονται πειραματικά και έχει βρεθεί ότι παίρνουν τιμές 3 και 4 αντίστοιχα.

### P3-T3 METHOD

Μια μέθοδος για τον υπολογισμό των NO<sub>x</sub> αεροπορικών κινητήρων σε υψόμετρο είναι η μέθοδος P3-T3. Η μέθοδος αυτή διορθώνει τις μετρήσεις που έχουν γίνει στο επίπεδο θαλάσσης, για τις συνθήκες σε κάθε ύψος. Η ιδέα βασίζεται στη γνώση της λειτουργίας του θαλάμου καύσης όσον αφορά τις εκπομπές σε σχέση με το ύψος αναφοράς.

#### Περιγραφή της μεθόδου

Η μέθοδος αυτή συνδέει τις εκπομπές σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας με τις αντίστοιχες εκπομπές σε επίπεδο θαλάσσης με τη σχέση:

$$EINOx_{ALT} = EINOx_{GL} * \left(\frac{P_{ALT}}{P_{GL}}\right)^n * \left(\frac{FAR_{ALT}}{FAR_{GL}}\right)^m * e^{19*(h_{GL}-h_{ALT})} \quad (6-75)$$

όπου:

GL: Επίπεδο αναφοράς(Ground Level)

ALT: ύψος(Altitude)

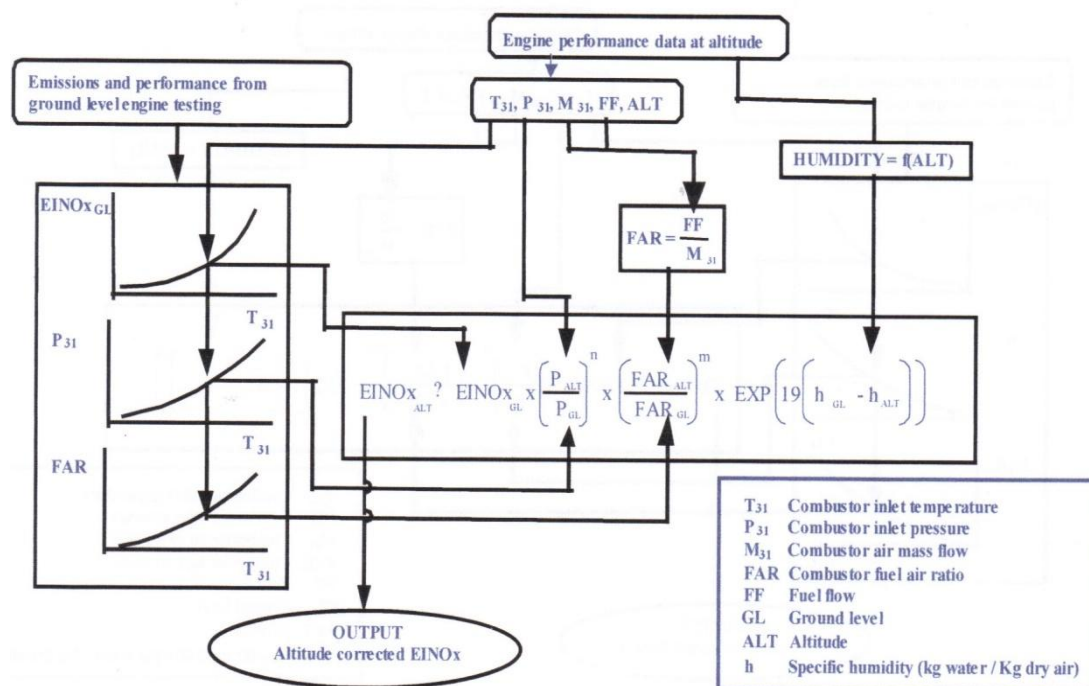
P: πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης

FAR: λόγος καυσίμου αέρα

h: υγρασία

Ο εκθέτης  $19*(h_{GL}-h_{ALT})$  μπορεί να υπολογιστεί όπως στην BOEING 2 fuel flow method από την εξίσωση (6-59).

Για καλύτερη κατανόηση αυτής της μεθόδου αξίζει να δούμε το παρακάτω σχήμα, στο οποίο φαίνεται ότι έχοντας τα θερμοδυναμικά δεδομένα στο υψόμετρο που μας ενδιαφέρει και βρίσκοντας, από την θερμοκρασία εισόδου στο θάλαμο καύσης και τα δεδομένα του ICAO, τις εκπομπές και τα θερμοδυναμικά δεδομένα στο επίπεδο αναφοράς, μπορούμε να υπολογίσουμε τον δείκτη εκπομπών σε υψόμετρο. Για τον υπολογισμό του  $EINOx_{GL}$ , του  $P_{GL}$  και του  $FAR_{GL}$  σε οποιαδήποτε συνθήκες αναφοράς κάνουμε γραμμική παρεμβολή με τη βοήθεια των στοιχείων που έχουμε από τα δεδομένα του ICAO.



Σχήμα 6.1: Διαδικασία υπολογισμού της μεθόδου P3T3

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό των CO και UHC. Όσο για τους εκθέτες n,m της σχέσης P3-T3, ο εκθέτης n του λόγου πίεσης κυμαίνεται από 0.3 έως 0.5. Ένας μέσος εκθέτης που υπολογίζεται είναι γύρω στο 0.4, ενώ για θαλάμους καύσης χαμηλών εκπομπών προτείνεται μια τιμή ίση με 0.2. Ο εκθέτης m του λόγου καυσίμου FAR μπορεί να θεωρηθεί ίσος με μηδέν δεδομένου ότι δεν αναμένονται σημαντικές μεταβολές του FAR.

## 6.6 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ

Οι παραπάνω σχέσεις που αναπτύχθηκαν μας βοηθάνε να πάρουμε μια εκτίμηση από τις εκπομπές των καυσαερίων που παράγονται κατά την καύση του καυσίμου ενός αεριοστρόβιλου ή αεροπορικού κινητήρα. Όμως, δεν μπορεί οποιαδήποτε τέτοια σχέση να εξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μια δεδομένη θερμική στροβιλομηχανή. Οι διαφορετικοί θάλαμοι καύσης και η τεχνολογία που χρησιμοποιούν όπως φτωχό προαναμεμιγμένο καύσιμο, οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και ο τύπος του καυσίμου είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπεμπόμενες ποσότητες των καυσαερίων γι' αυτό και δεν είναι εύκολο να τις εκτιμήσουμε με μια ημιεμπειρική σχέση με τον τρόπο που έχει δημοσιευθεί. Είναι αναγκαίο λοιπόν να κάνουμε κάποια προσαρμογή της σχέσης που εκτιμάει τα καυσαέρια έτσι ώστε να προσαρμόσουμε τα αποτελέσματα της σε σχέση με τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα.

Ένας πρώτος τρόπος που μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα εκτίμησης των ημιεμπειρικών σχέσεων είναι μέσω τη κλίμακας (adaptation through scaling). Χρησιμοποιείται δηλαδή ένας διορθωτικός συντελεστής, που για κάθε ημιεμπειρική σχέση αλλάζει ώστε οι εκτιμώμενες εκπομπές να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πειραματικές.

Για τον υπολογισμό της ακρίβειας των αποτελεσμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση απόλυτη απόκλιση (AAD: Average Absolute Deviation) ως εξής:

$AAD = \frac{\sum_{i=1}^n \left  \left( \frac{e_i^{pred}}{e_i^{meas}} - 1 \right) \right }{n}$	(6-76)
--	--------

όπου:

n : αριθμός πειραματικών δεδομένων

$e^{pred}$  = predicted emission

$e^{meas}$  = measured emission

Στις περισσότερες περιπτώσεις η προσαρμογή της σχέσης με ένα μόνο συντελεστή βελτιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Ένας άλλος τρόπος, ο οποίος είναι και πιο ακριβής, για την προσαρμογή των ημιεμπειρικών σχέσεων με τα πειραματικά δεδομένα είναι η εφαρμογή πιο πολύπλοκων μεθόδων βελτιστοποίησης. Η βέλτιστη προσαρμογή των σχέσεων αυτών μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας στο ελάχιστο την παρακάτω συνάρτηση:

$CF = \sum_{i=1}^n [(e_i^{pred} - e_i^{meas}) * w_i]^2$	(6-77)
---	--------

όπου:

n : αριθμός πειραματικών δεδομένων

$e^{pred}$  : predicted emission

$e^{meas}$  : measured emission

w: συντελεστής βαρύτητας

Η ελαχιστοποίηση της παραπάνω συνάρτησης μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την Simplex Downhill Method in multi-dimensions. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται

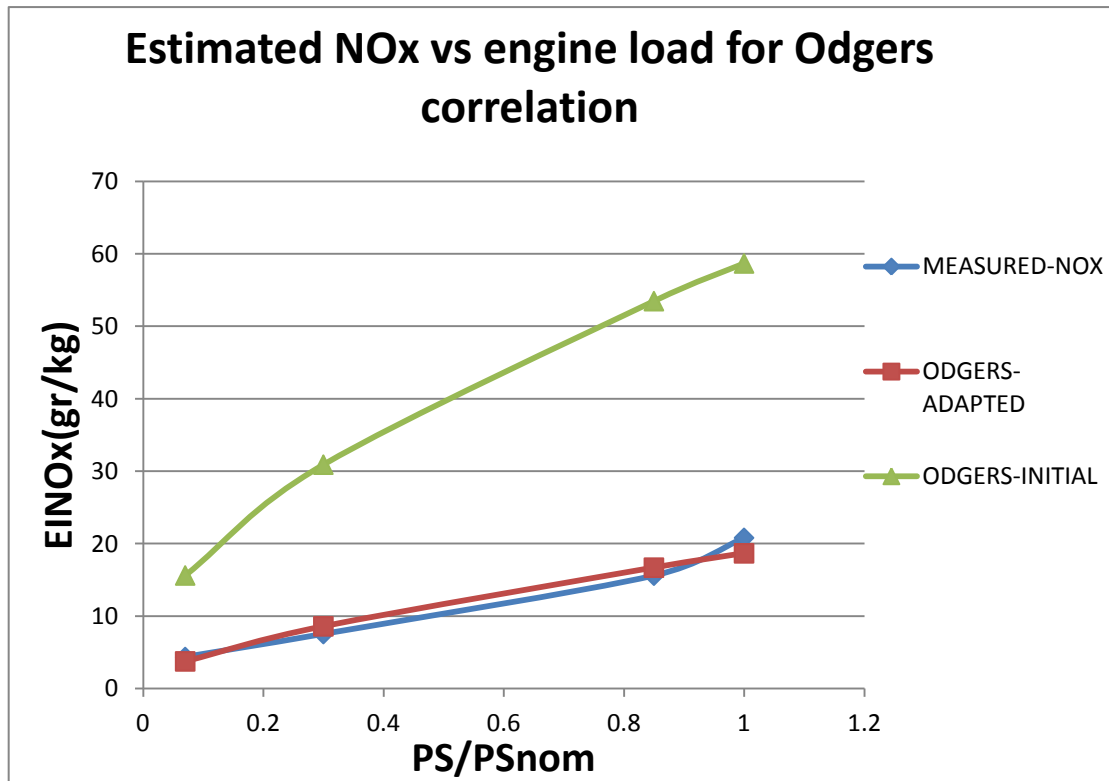
τόσοι συντελεστές όσες και οι μεταβλητές που χαρακτηρίζουν την εξίσωση(π.χ. T3, P3, χρόνος παραμονής) με σκοπό την μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα σύγκρισης των πειραματικών δεδομένων της μηχανής CFM-56 με τα αποτελέσματα της ημιεμπειρικής σχέσης των Odgers & Kretchmer πριν και μετά την προσαρμογή της. Η εξίσωση των Odgers & Kretchmer που έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενη παράγραφο (6-2) μετασχηματίζεται στην παρακάτω εξίσωση (adapted):

$$EINOx = C1 * 29 * e^{\left(\frac{-21.67 * C2}{T_{flame}}\right)} * P_3^{0.66 * C3} * [1 - e^{(-250 * t_{form} * C4)}] \quad (6-78)$$

όπου C1,C2,C3,C4 είναι οι συντελεστές που πρέπει να πάρουν τις κατάλληλες τιμές για τη βέλτιστη προσαρμογή των μετρήσεων με τα πειραματικά.

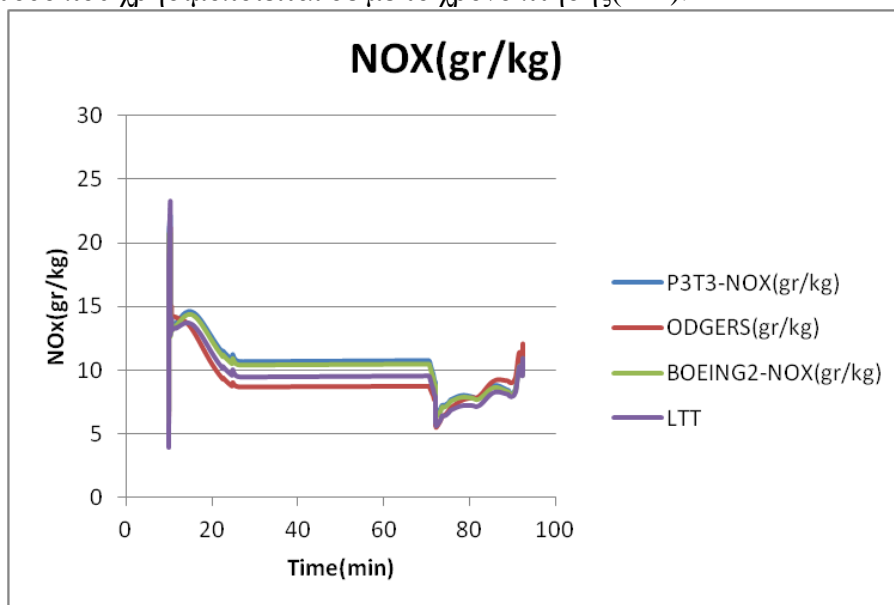
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα των σχέσεων (6-2), (6-78) και των δεδομένων από τον ICAO για διάφορες συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα CFM-56:



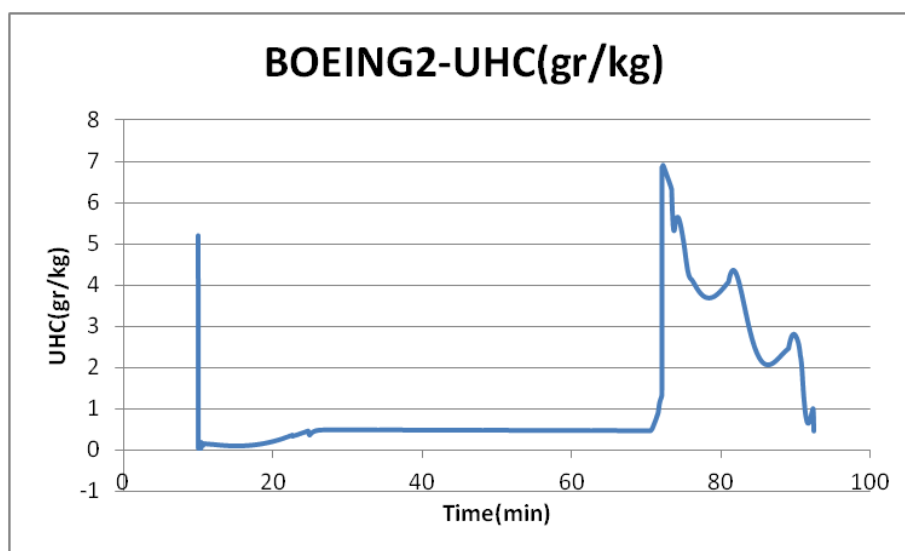
Σχήμα 6.2: εκτιμώμενα NOx με την αρχική και την προσαρμοσμένη σχέση του Odgers και οι πραγματικές μετρήσεις.

Από το Σχήμα 6.2 βλέπουμε τη μεγάλη ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των adaptation methods.

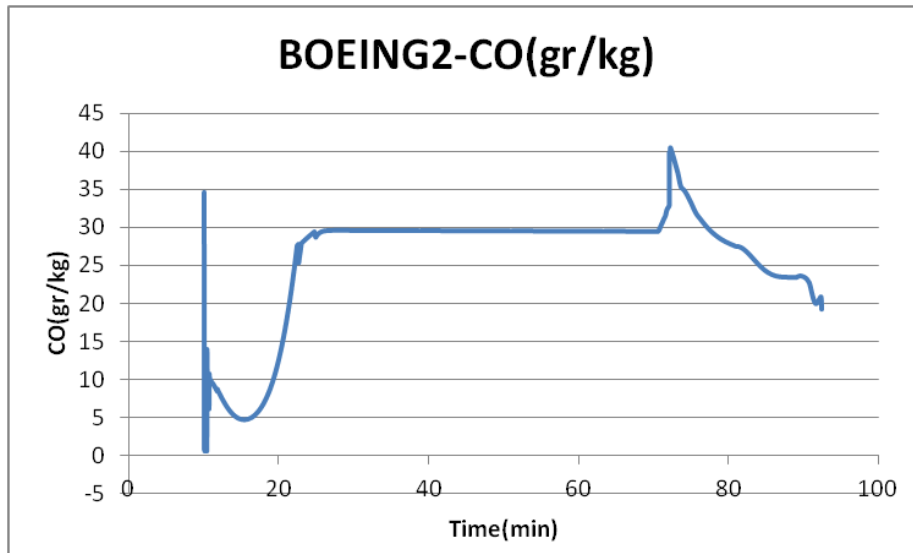
Χρησιμοποιήθηκαν ακόμη δεδομένα από μία ανάλυση αποστολής για τον κινητήρα CFM-56 για τον υπολογισμό των εκπομπών των καυσαερίων σε όλη τη διάρκεια της πτήσης. Για τον υπολογισμό των NO<sub>x</sub> χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις: η P3T3, η BOEING2, η Odgers και η LTT, ενώ για τον υπολογισμό των CO και UHC χρησιμοποιήθηκε η BOEING2. Πρέπει ακόμα να τονιστεί ότι η σχέση LTT και Odgers έχουν βελτιστοποιηθεί με τη βοήθεια των adaptation methods. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι δείκτες εκπομπών(gr/kg καυσίμου) των καυσαερίων για κάθε μέθοδο που χρησιμοποιείται σε με το χρόνο πτήσης(min):



Σχήμα 6.3: Δείκτης εκπομπών των NO<sub>x</sub> σε σχέση με τον χρόνο της πτήσης

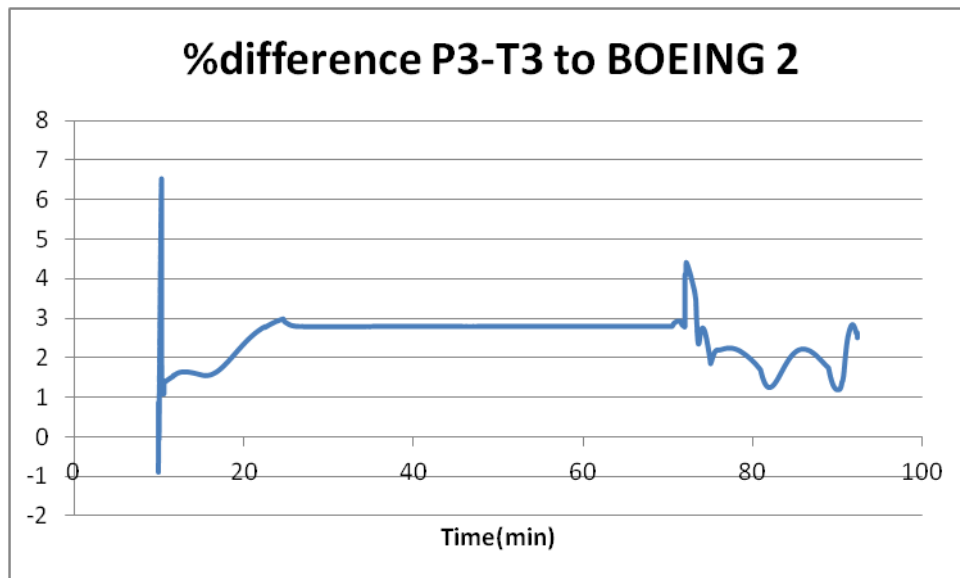


Σχήμα 6.4: Δείκτης εκπομπών των CO σε σχέση με τον χρόνο της πτήσης

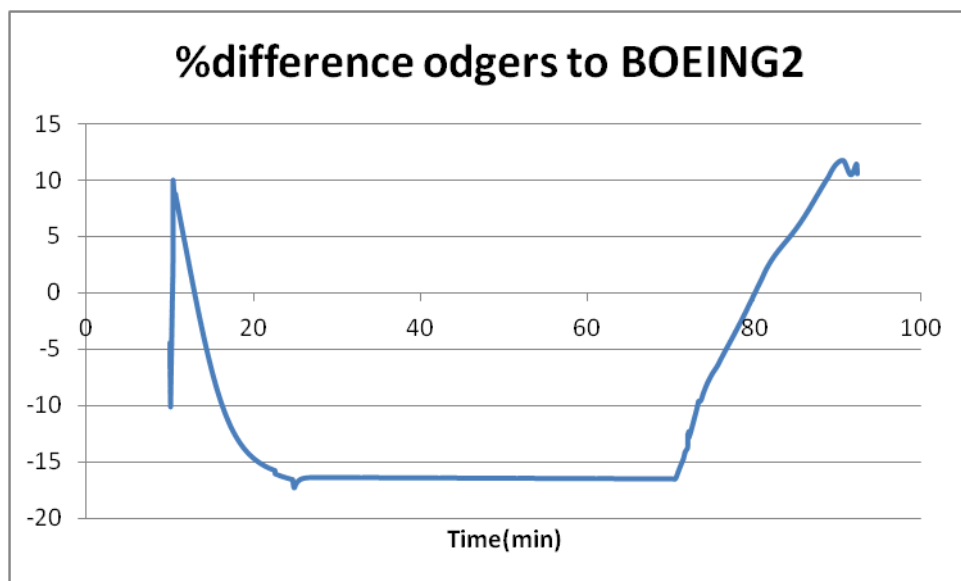


Σχήμα 6.5: Δείκτης εκπομπών των UHC σε σχέση με τον χρόνο της πτήσης

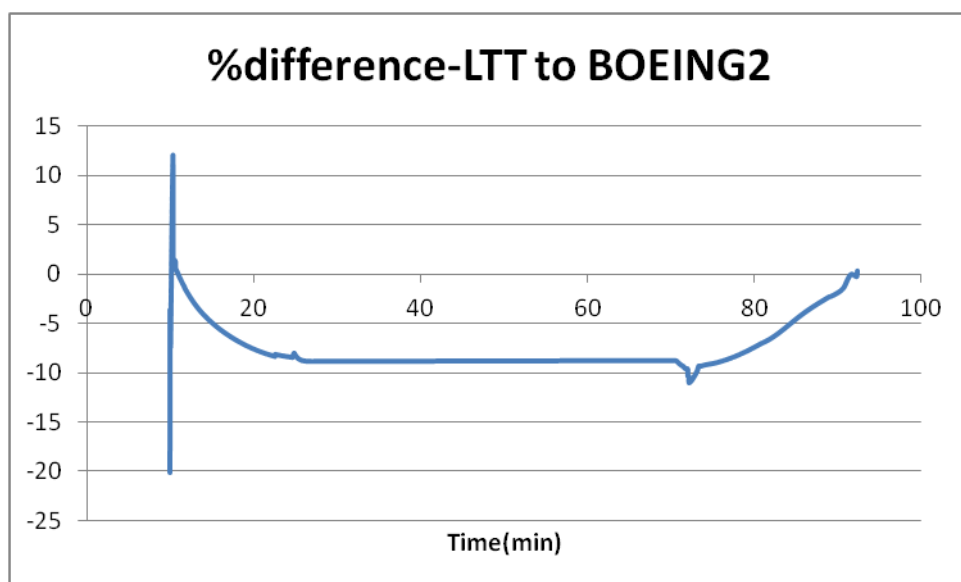
Από τα παραπάνω γίνεται φανερό πως οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> αυξάνονται στα υψηλά φορτία ενώ τα CO και τα UHC αυξάνουν στα χαμηλά φορτία του κινητήρα. Όσον αφορά τη σύγκλιση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τα NO<sub>x</sub>, στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται οι επί τις εκατό διαφορές τους σε σχέση με την μέθοδο BOEING2.



Σχήμα 6.6: Η επί τις εκατό διαφορά των NO<sub>x</sub> με την P3T3 σε σχέση με την BOEING2 για κάθε χρόνο της πτήσης



Σχήμα 6.7: Η επί τις εκατό διαφορά των NO<sub>x</sub> με την Odgers σε σχέση με την BOEING2 για κάθε χρόνο της πτήσης



Σχήμα 6.8: Η επί τις εκατό διαφορά των NO<sub>x</sub> με την LTT σε σχέση με την BOEING2 για κάθε χρόνο της πτήσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε μεγάλη σύγκλιση της P3T3 με την BOEING2 της τάξεως του 3% στο μεγαλύτερο κομμάτι της πτήσης. Η ημιεμπειρικές σχέσεις LTT και Odgers παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις στις τιμές τους σε σχέση με τις τιμές της BOEING2 παρόλο που έχουν χρησιμοποιηθεί οι adaptation methods.



# 7

## ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΣΤΟ PROOSIS ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος μοντελοποίησης των ημιεμπειρικών σχέσεων, που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο πρόγραμμα PROOSIS το οποίο χρησιμοποιείται από το εργαστήριο θερμικών στροβιλομηχανών. Δημιουργήθηκε δηλαδή ένας θάλαμος καύσης(burner) ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε ημιεμπειρική σχέση για να εκτιμήσει τις εκπομπές των καυσαερίων. Ακόμη, στο κεφάλαιο αυτό εξάγονται συμπεράσματα για τις εκπομπές των καυσαερίων αν υπάρχει κάποια βλάβη στη μηχανή. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή από την βιβλιοθήκη του προγράμματος, στην οποία αντικαταστάθηκε ο burner της μηχανής με τον burner των ημιεμπειρικών σχέσεων. Τέλος διερευνάται αν και κατά πόσο μπορούν οι εκπομπές των καυσαερίων να χρησιμοποιηθούν για διαγνωστικούς σκοπούς. Παρακάτω δίνονται αναλυτικά τα βήματα που έγιναν στο πρόγραμμα και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή του.

### **7.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ BURNER**

Για τη δημιουργία του θαλάμου καύσης απαραίτητη προϋπόθεση ήταν να φτιαχτούν όλες οι υπορουτίνες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ημιεμπειρικών σχέσεων και μεθόδων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μία υπορουτίνα σαν παράδειγμα:

```

-----
-- Function: SNECMA
-- NOx correlation
-----
-- INPUT:
-- T3 =inlet temperature of combustion chamber [K]
-- P3=inlet pressure of combustion chamber [Pa]
-- MAIR= air mass flow [kg/s]
-- V=volume of the combustor [m**3]
-- OUTPUT:
-- SNECMANOX= nitrogen oxides [gr/kg]
-----
FUNCTION REAL SNECMANOX (IN REAL T3, IN REAL P3, IN REAL MAIR, IN REAL V, IN REAL COEF[])
  DECLS|
    REAL NOX
    REAL C1
    REAL C2
    REAL C3
    REAL C4
  BODY
    C1=225.013*COEF[1]
    C2=0.5*COEF[2]
    C3=230*COEF[3]
    C4=-0.8219*COEF[4]
    NOX=C1*(MAIR*(T3**C2)/(V*(P3/1e5)*exp(T3/C3)))*C4
  RETURN NOX
END FUNCTION

```

Σχήμα 7.1: Τυπικό παράδειγμα υπορουτίνας για τον υπολογισμό των NOx με της σχέσης SNECMA.

Η συγκεκριμένη υπορουτίνα χρησιμοποιεί τα δεδομένα που χρειάζεται από το πρόγραμμα δηλαδή την θερμοκρασία και πίεση στην είσοδο του θαλάμου καύσης, την παροχή του αέρα και τον όγκο του θαλάμου καύσης, για να υπολογίσει τις εκπομπές των NOx σε gr/kg σύμφωνα με την ημιεμπειρική σχέση της SNECMA. Η υπορουτίνα αυτή επιτρέπει την προσαρμογή της εξίσωσης έτσι ώστε να αυξηθεί η ακρίβειά της, καθώς διαθέτει συντελεστές που λαμβάνοντας τις κατάλληλες τιμές από το πρόγραμμα μπορούν να μειώσουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό το σφάλμα σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.(σελίδα 6.25)

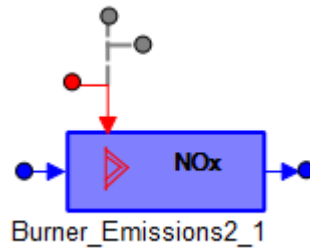
Στην πορεία χρησιμοποιήθηκε από τη βιβλιοθήκη του PROOSIS ένας κώδικας ο οποίος μετονομάστηκε σε TurboEmissions2 και τροποποιήθηκε έτσι ώστε να καλεί τις υπορουτίνες ανάλογα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις που επιλέγονται.

Ακόμη χρησιμοποιήθηκε ένα σχηματικό διάγραμμα (Schematic General\_1) στο οποίο επιλέγεται το καύσιμο που θέλουμε:



Σχήμα 7.2: σχηματικό διάγραμμα

Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε ένας θάλαμος καύσης που μπορεί να εκτιμήσει τις εκπομπές των NOx, CO, UHC και καπνού με την επιθυμητή ημιεμπειρική σχέση που επιλέγουμε.



Σχήμα 7.3: σχηματικό διάγραμμα του θαλάμου καύσης που δημιουργήθηκε

Τα δεδομένα που χρειάζεται το πρόγραμμα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και είναι τα εξής:

Πίνακας 7-1: Δεδομένα που χρειάζεται ο burner στην είσοδό του

ΟΝΟΜΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
F_in.Ang	Γωνία ροής
F_in.FARB	Καιόμενος λόγος καυσίμου-αέρα
F_in.FARU	Άκαυστος λόγος καυσίμου-αέρα
F_in.Pt	Ολική πίεση εισόδου
F_in.Tt	Ολική θερμοκρασία εισόδου
F_in.W	Ολική Παροχή μάζας
F_in.WAR	Λόγος νερού-αέρα
Fu_in.W	Παροχή καυσίμου
TURBO.MNf	Flight Mach number
TURBO.Pamb	Πίεση περιβάλλοντος
TURBO.Tamb	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
TURBO.WAR	Λόγος νερού-αέρα σε συνθήκες περιβάλλοντος

Στον Πίνακα 7-2 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα εκτίμησης των NOx, CO, UHC για διάφορες ημιεμπειρικές σχέσεις, λαμβάνοντας ως δεδομένα τα εξής:

$F_{in.Ang} = 0$   
 $F_{in.FARB} = 0.025$   
 $F_{in.FARU} = 0.0001$   
 $F_{in.Pt} = 3000000$   
 $F_{in.Tt} = 800$   
 $F_{in.W} = 48$   
 $F_{in.WAR} = 0.013$   
 $Fu_{in.W} = 1.25$   
 $TURBO.MNf = 0.0$   
 $TURBO.Pamb = 101325$   
 $TURBO.Tamb = 280.15$   
 $TURBO.WAR = 0.001$

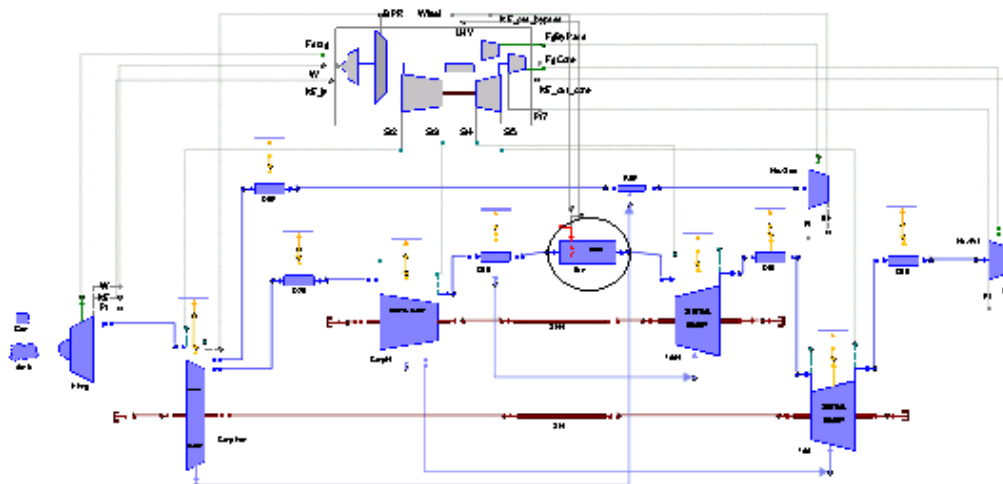
Έχουμε λοιπόν για τα παραπάνω δεδομένα τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 7-2: αποτελέσματα εκτίμησης των εκπομπών με ημιεμπειρικές σχέσεις

ΣΧΕΣΗ	EINOX	EICO	EIUHC
SNECMA	19.2201	-	-
MTU	26.4661	-	-
P3T3	22.6027	-	-
BOEING1	21.2697	0.540005	0.050001
BOEING2	22.9174	0.492088	0.045564
GASTURB2	22.1972	-	-

## 7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ BURNER ΣΕ ΕΝΑ TURBOFAN

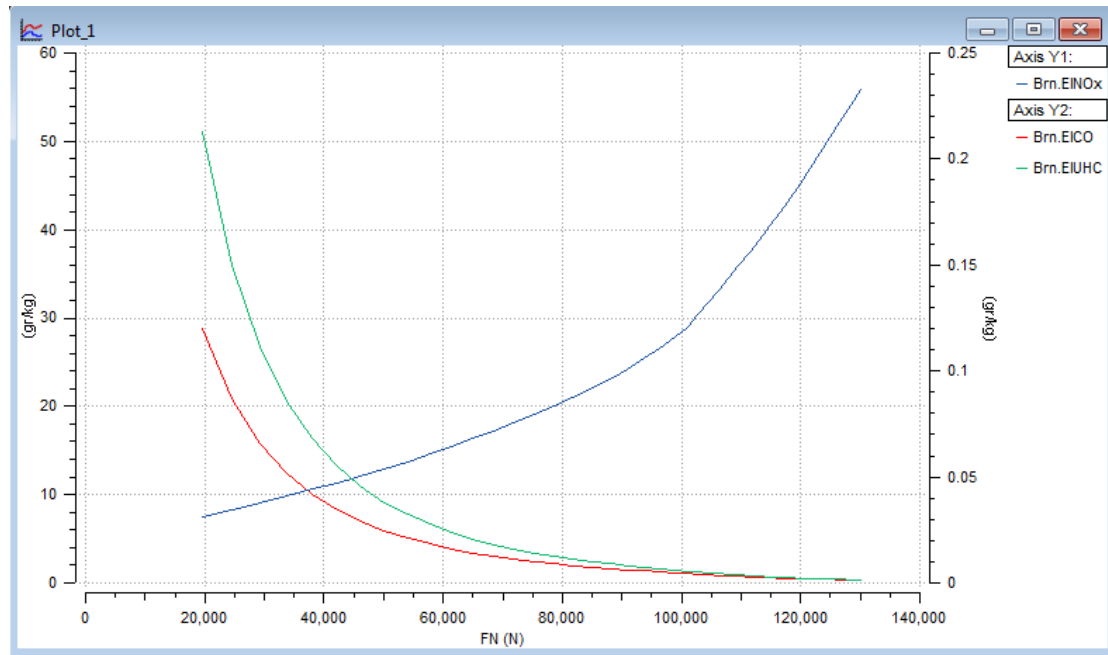
Αφού φτιάχτηκε ο θάλαμος καύσης που μπορεί να εκτιμήσει τις εκπομπές των καυσαερίων, χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια ένα παράδειγμα μιας έτοιμης μηχανής από τη βιβλιοθήκη του Proosis στην οποία αντικαταστάθηκε ο burner που προϋπήρχε, με τον burner που φτιάχτηκε. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα Turbofan διπλού τυμπάνου χωρίς ανάμειξη (Gas Turbine Engine Example Turbofan twin spool Unmixed Off design).



Σχήμα 7.4: Σχηματικό διάγραμμα του Turbofan όπου με κύκλο απεικονίζεται ο burner που δημιουργήθηκε.

Αρχικά έγινε μια παραμετρική ανάλυση (parametric) με την παροχή του καυσίμου να αλλάζει από 0.2 έως 1.8 kg/s. Με αυτό τον τρόπο βλέπουμε πως αναπτύσσονται οι δείκτες εκπομπών των NO<sub>x</sub>, CO και UHC ανάλογα με τη μεταβολή της ώσης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτή η μεταβολή εκπομπών σε σχέση με την

ώση στο οποίο έγινε χρήση των σχέσεων της MTU για τα NO<sub>x</sub>, και του Lefebvre για τα CO και UHC.



Σχήμα 7.5: Οι δείκτες εκπομπών των NO<sub>x</sub>, CO και UHC σε σχέση με την ώση

Αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 7.5 είναι η αύξηση των οξειδίων του αζώτου με την αύξηση της ώσης. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί με την αύξηση της ώσης αυξάνεται και η θερμοκρασία καύσης, και επειδή οι αντιδράσεις σχηματισμού των NO<sub>x</sub> συντελούνται με ικανοποιητικό ρυθμό σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουμε σαν αποτέλεσμα αύξηση των εκπομπών των NO<sub>x</sub>. Όσον αφορά το μονοξείδιο του άνθρακα και τους άκαυστους υδρογονάνθρακες, μειώνονται με την αύξηση της ώσης, και αυτό γιατί αυξανόμενη της ώσης πλησιάζουμε όλο και πιο κοντά στο σημείο λειτουργίας της μηχανής που σημαίνει καλύτερος βαθμός απόδοσης της καύσης με λιγότερα άκαυστα.

Ένας τρόπος για να εισάγουμε μία βλάβη σε μία μηχανή είναι να χρησιμοποιήσουμε κάποιους συντελεστές, οι οποίοι θα έχουν την δυνατότητα να προσομοιώσουν μία οποιαδήποτε βλάβη σε κάθε επιμέρους συνιστώσα της μηχανής. Οι συντελεστές αυτοί ονομάζονται συντελεστές προσαρμογής και είναι ενσωματωμένοι στο μοντέλο της μηχανής που χρησιμοποιήσαμε. Για παροχή καυσίμου  $WF=1\text{kg/s}$  η οποία δίνει τη μέγιστη ώση στον κινητήρα έγινε μία ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity) όλων των συντελεστών προσαρμογής (scalar adaptation factors) με μείωση του κάθε ένα ξεχωριστά κατά 1%. Για σταθερό δηλαδή καύσιμο προέκυψε η ποσοστιαία διαφορά των NO<sub>x</sub>, CO και UHC για μείωση του κάθε συντελεστή προσαρμογής κατά 1% στο σημείο λειτουργίας. Με αυτόν τρόπο θα φανεί κατά πόσο και με ποιο τρόπο επηρεάζονται οι εκπομπές των καυσαερίων με την εισαγωγή κάποιας βλάβης. Οι συντελεστές προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 7-3.

Πίνακας 7-3: Συντελεστές προσαρμογής

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΣΤΟ PROOSIS	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
SE2	CmpFan.s_Adapteff_pri.in	συντελεστής βαθμού απόδοσης FAN στην 1η ζώνη
SE12	CmpFan.s_Adapteff_sec.in	συντελεστής βαθμού απόδοσης FAN στην 2η ζώνη
SW2	CmpFan.s_AdaptWc_pri.in	συντελεστής παροχής μάζας FAN στην 1η ζώνη
SW12	CmpFan.s_AdaptWc_sec.in	συντελεστής παροχής μάζας FAN στην 2η ζώνη
SE3	CmpH.s_AdaptEff.in	συντελεστής βαθμού απόδοσης συμπιεστή υψηλής
SW3	CmpH.s_AdaptWc.in	συντελεστής παροχής μάζας συμπιεστή υψηλής
SE41	TrbH.adapt.Eff_in	συντελεστής βαθμού απόδοσης στρόβιλου υψηλής
SW41	TrbH.adapt.Wc_in	συντελεστής παροχής μάζας στρόβιλου υψηλής
SE49	TrbL.adapt.Eff_in	συντελεστής βαθμού απόδοσης στρόβιλου χαμηλής
SW49	TrbL.adapt.Wc_in	συντελεστής παροχής μάζας στρόβιλου χαμηλής

Στον Πίνακα 7-4 βλέπουμε τις % διαφορές των NOx χρησιμοποιώντας τις σχέσεις MTU και GE καθώς και τις % διαφορές της Pt3 και Tt3 για μείωση του κάθε scalar adaptation factor κατά 1%:

Πίνακας 7-4: Ποσοστιαία μεταβολή του EINOx για μείωση του κάθε scalar adaptation factor κατά 1%

	EINOX-MTU	EINOX-GE	Pt3	Tt3
SE2	-0.1142	-0.1438	0.0422	-0.0632
SE12	0.0405	0.051	0.028	0.0171
SW2	0.0229	0.0289	0.0151	0.0098
SW12	-0.0388	-0.0488	-0.0262	-0.0164
SE3	-0.0562	-0.0708	1.4548	-0.2107
SW3	-0.0669	-0.0843	-0.3943	0.015
SE41	1.2442	1.5674	1.9722	0.3905
SW41	-1.1078	-1.3955	-1.3271	-0.3875
SE49	0.05	0.063	0.0375	0.0207
SW49	0.5446	0.6861	0.8839	0.1674

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα βλέπουμε στους πίνακες (Πίνακας 7-5, Πίνακας 7-6) για τα CO και UHC χρησιμοποιώντας τις σχέσεις Doppelheuer και Lefebvre αντίστοιχα.

Πίνακας 7-5: Ποσοστιαία μεταβολή του EICO για μείωση του κάθε scalar adaptation factor κατά 1%

	EICO-DOP	EICO-LEF	Pt3	Tt3
SE2	0.023	0.0888	0.0422	-0.0632
SE12	-0.0648	-0.0216	0.028	0.0171
SW2	-0.0359	-0.0127	0.0151	0.0098
SW12	0.0611	0.0208	-0.0262	-0.0164
SE3	-1.9565	0.3402	1.4548	-0.2107
SW3	0.5816	-0.021	-0.3943	0.015
SE41	-3.6078	-0.4499	1.9722	0.3905
SW41	3.7243	1.9655	-1.3271	-0.3875
SE49	-0.0839	-0.0262	0.0375	0.0207
SW49	-1.5799	-0.1944	0.8839	0.1674

Πίνακας 7-6: Ποσοστιαία μεταβολή του EIUHC για μείωση του κάθε scalar adaptation factor κατά 1%

	EIUHC-DOP	EIUHC-LEF	Pt3	Tt3
SE2	0.023	0.1358	0.0422	-0.0632
SE12	-0.0648	-0.0306	0.028	0.0171
SW2	-0.0359	-0.0177	0.0151	0.0098
SW12	0.0611	0.0295	-0.0262	-0.0164
SE3	-1.9565	0.6584	1.4548	-0.2107
SW3	0.5816	-0.0815	-0.3943	0.015
SE41	-3.6078	-0.4793	1.9722	0.3905
SW41	3.7243	1.2498	-1.3271	-0.3875
SE49	-0.0839	-0.0366	0.0375	0.0207
SW49	-1.5799	-0.2068	0.8839	0.1674

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούμε την μεγάλη εξάρτηση των εκπομπών καυσαερίων στην Pt3 και Tt3. Η αύξηση των δύο αυτών παραμέτρων οδηγεί σε αύξηση των NOx και μείωση των CO και UHC. Επομένως ανάλογα με το τι επίπτωση προκαλεί η αλλαγή ενός scalar adaptation factor στην Pt3 και Tt3 έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα για τις εκπομπές των καυσαερίων.

Πέρα από τις προηγούμενες εφαρμογές, υπολογίστηκαν τα NOx, CO και UHC σε έναν LTO CYCLE(Landing Take-Off CYCLE) για να μπορέσουμε να δούμε μία καλύτερη εικόνα για την συμπεριφορά των εκπομπών σε μία βλάβη. Σύμφωνα με τον LTO CYCLE εξετάζεται η λειτουργία και οι εκπομπές ενός κινητήρα σε όλες τις φάσεις ενός τυπικού κύκλου προσγείωσης-απογείωσης ενός αεροσκάφους.

Η ώση κάθε φάσης του κύκλου LTO καθορίζεται ως ποσοστό της ονομαστικής ώσης του κινητήρα, η οποία κατά κανόνα αναφέρεται στο επίπεδο θαλάσσης και σε συνθήκες τυπικής ημέρας. Πρέπει να τονισθεί ότι οι φάσεις του LTO CYCLE όπως και η ώση κάθε φάσης, διαφέρουν για κινητήρες υποηχητικών και υπερηχητικών αεροσκαφών. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι φάσεις για υποηχητικά(Πίνακας 7-7) και

υπερηχητικά(Πίνακας 7-8) αεροσκάφη με τα αντίστοιχα ποσοστά ώσεως για κάθε φάση καθώς και τον αντίστοιχο χρόνο λειτουργίας:

Πίνακας 7-7:Φασεις LTO CYCLE για υποχηχητικά αεροσκάφη

ICAO DATA	ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΝΟΜΑΤΙΚΗΣ ΩΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ(min)
TAKE-OFF	100%	0.7
CLIMB OUT	85%	2.2
APPROACH	5%	4
IDLE	7%	26

Πίνακας 7-8: Φασεις LTO CYCLE για υπερχηχητικά αεροσκάφη

ICAO DATA	ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΝΟΜΑΤΙΚΗΣ ΩΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ(min)
TAKE-OFF	100%	1.2
CLIMB OUT	65%	2
DESCENT	15%	1.2
APPROACH	34%	2.3
IDLE	5.80%	26

Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ο κινητήρας θεωρείται ότι ανήκει σε υποχηχητικό αεροσκάφος. Συνεπώς οι εκπομπές των καυσαερίων εκτιμήθηκαν με βάση τον Πίνακα 7-7. Για τον υπολογισμό των εκπομπών αυτών χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις P3T3 για τα NOx και η BOEING2 για τα CO και UHC. Επειδή όμως δεν υπάρχουν δεδομένα από το ICAO για τις εκπομπές των καυσαερίων του συγκεκριμένου κινητήρα θεωρήθηκε ότι οι εκπομπές των καυσαερίων κατά ICAO είναι ίδιες με του κινητήρα CFM-56 ο οποίος είναι παρόμοιος με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε και ξέρουμε τα δεδομένα των καυσαερίων από το ICAO. Τα δεδομένα αυτά είναι τα εξής:

Πίνακας 7-9: Δεδομένα από ICAO για τον CFM-56

ICAO DATA	EI UHC(gr/kg)	EICO(gr/kg)	EINOX(gr/kg)
TAKE-OFF	0.05	0.54	20.81
CLIMB OUT	0.06	1.97	15.59
APPROACH	4.21	24.28	7.53
IDLE	5.56	38.73	4.36

Για 100% της ισχύος θεωρήθηκε στο μοντέλο το σημείο λειτουργίας που είχε οριστεί προηγουμένως, δηλαδή ώση  $F_N = 93603.5225N$  και παροχή καυσίμου  $WF = 1kg/s$ . Έτσι για τα τέσσερα ποσοστά της ονομαστικής ώσης της μηχανής δηλαδή το 100% ή το 85% ή το 30% ή το 7% υπολογίζονται οι δείκτες εκπομπών των καυσαερίων. Στη συνέχεια καθορίζεται από τους δείκτες εκπομπών η συνολική μάζα του κάθε ρύπου( $grNO_x$ ,  $grCO$ ,  $grUHC$ ) που έχει παραχθεί από τη λειτουργία του κινητήρα η οποία ανάγεται ανά kN ώσης. Έτσι για κάθε ρύπο εξετάζεται η τιμή της παραμέτρου  $D_p/F_{oo}$  όπου  $D_p$  είναι η συνολική μάζα του παραγόμενου ρύπου( $gr$ ) και  $F_{oo}$  η ονομαστική ώση(kN).



Τα αποτελέσματα της παραμέτρου Dp/Foo για τους ρύπους NO<sub>x</sub>, CO και UHC φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7-10: Dp/Foo για υγιή λειτουργία

	Dp/Foo
NO <sub>x</sub>	39.3325
CO	81.0104
UHC	11.862

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία για το LTO CYCLE μειώνοντας κάθε φορά κατά 1% έναν συντελεστή προσαρμογής. Συνεπώς βλέπουμε την επί τις εκατό διαφορά της παραμέτρου Dp/Foo για τους τρεις τύπους καυσαερίων σε σχέση με τις τιμές του Πίνακας 7-10:

Πίνακας 7-11: Ποσοστιαία μεταβολή του Dp/Foo των NO<sub>x</sub>, CO και UHC για μείωση του κάθε scalar adaptation factor κατά 1%

	DEVIATION-NOX%	DEVIATION-CO%	DEVIATION-UHC%
SE2	0.51	-0.0216	-0.035
SE12	6.5	2.231	2.8559
SW2	0.11	-0.0141	-0.0089
SW12	0.17	-0.2093	-0.2131
SE3	1.51	0.0054	-0.2733
SW3	0.11	-0.1988	-0.2211
SE41	0.06	0.0086	-0.3325
SW41	1.15	-0.2061	-0.225
SE49	1.34	-0.0811	-0.1818
SW49	-0.77	-0.0957	-0.1946

Παρατηρούμε από τον Πίνακας 7-11 ότι για έναν κύκλο προσγείωσης-απογείωσης οι συνολικές εκπομπές των NO<sub>x</sub> αυξάνονται με την εισαγωγή οποιασδήποτε βλάβης(εκτός από την SW49) με τη μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται για βλάβη στη πρωτεύουσα ζώνη του FAN. Αντιθέτως για τα CO και τα UHC παρατηρούμε μείωση των συνολικών τους εκπομπών για τις περισσότερες βλάβες.

Πέρα όμως από τη μείωση του κάθε scalar adaptation factor ξεχωριστά, χρησιμοποιήθηκαν συνδυασμένες βλάβες από κατασκευαστές, οι οποίες παρατηρούνται συχνά σε αεριοστροβίλους. Αυτές οι βλάβες αναπαριστώνται δηλαδή με μια σειρά από μεταβολές των scalar adaptation factors οι οποίες εμφανίζονται ταυτόχρονα στη μηχανή. Ο επόμενος πίνακας(Πίνακας 7-12) δείχνει τέσσερις βλάβες που είναι πιθανό να εμφανιστούν σε μία πραγματική μηχανή:

Πίνακας 7-12: %μεταβολές των συντελεστών προσαρμογής για συνδυασμένες βλάβες

ΒΛΑΒΗ-1	ΒΛΑΒΗ-2	ΒΛΑΒΗ-3	ΒΛΑΒΗ-4
SE2:-0.4%	SW41:1%	SE41:-1%	SE49:-0.6%
SE12=-0.5%	-	SW41:-1%	SW49:1%
SW2:-0.7%	-	-	-
SW12:-1%	-	-	-

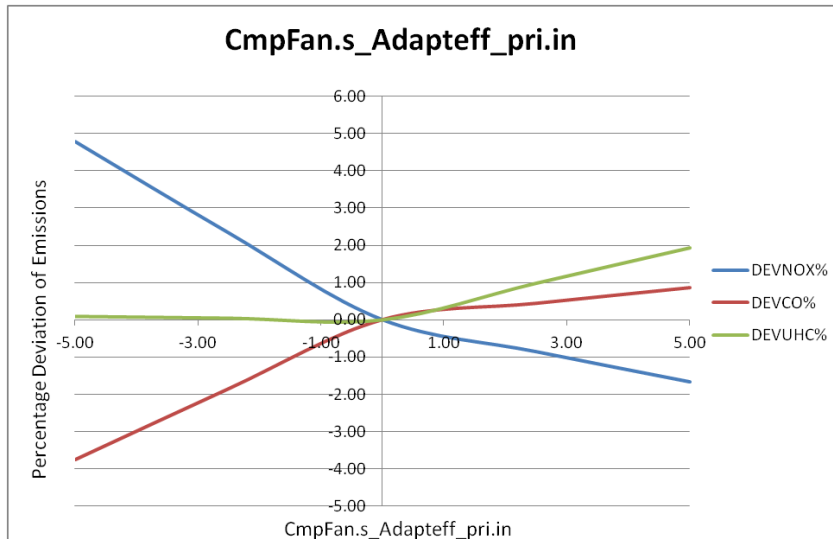
Σύμφωνα λοιπόν με αυτές τις τέσσερις συνδυασμένες βλάβες υπολογίστηκαν οι εκπομπές των NO<sub>x</sub>, CO και UHC(σε gr/kN) σε ένα κύκλο προσγείωσης-απογείωσης (LTO CYCLE) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες εκπομπές για υγιή λειτουργία της μηχανής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7-13: Ποσοστιαία μεταβολή του Dp/F<sub>00</sub> των NO<sub>x</sub>, CO και UHC για τις συνδυασμένες βλάβες

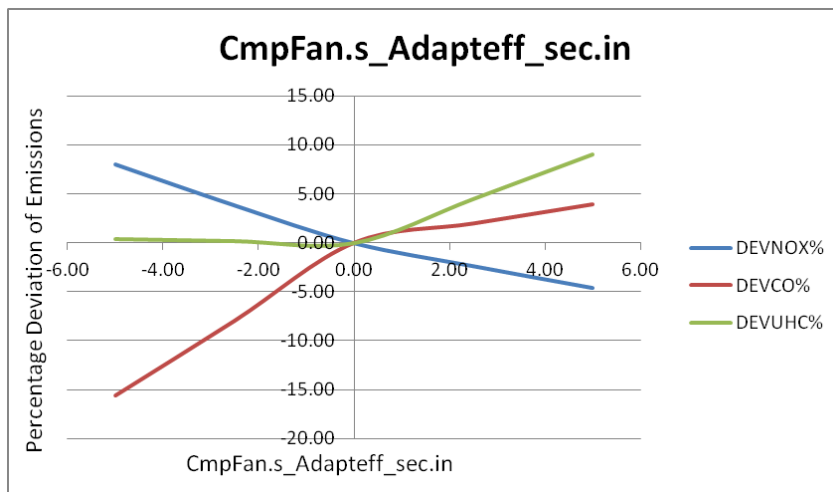
	DEVIATION-NOX%	DEVIATION-CO%	DEVIATION-UHC%
ΒΛΑΒΗ-1	-0.08	-0.13	-0.06
ΒΛΑΒΗ-2	-0.81	-0.1	-0.2
ΒΛΑΒΗ-3	1.02	0	-0.3
ΒΛΑΒΗ-4	1.65	-0.16	0.59

Παρατηρούμε ότι για τις βλάβες 1 και 2 έχουμε μείωση όλων των εκπομπών. Η βλάβη 3 ( αναφέρεται σε βλάβες στον στρόβιλο υψηλής) δεν επηρεάζει θετικά ή αρνητικά τις εκπομπές του CO ενώ αυξάνει τις συνολικές εκπομπές των NO<sub>x</sub> και μειώνει των UHC. Για την βλάβη 4 (αναφέρεται σε βλάβες στον στρόβιλο χαμηλής), παρατηρούμε αύξηση των NO<sub>x</sub> και UHC και μείωση του CO.

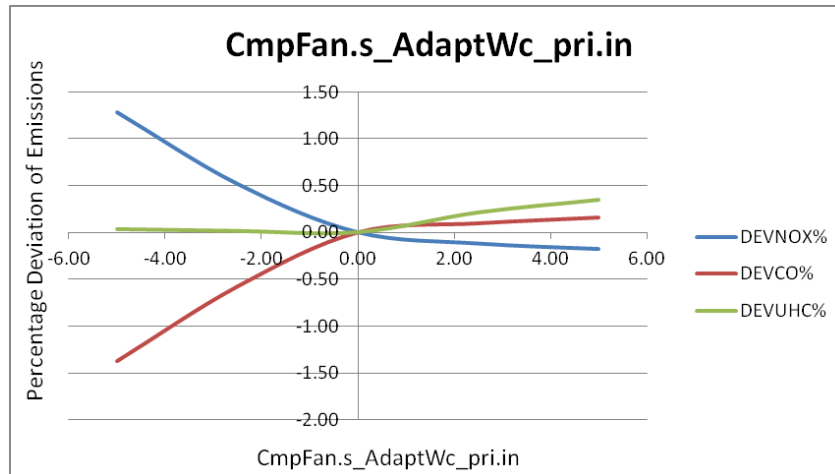
Ακόμη στο 85% της ονομαστικής ώσης, χρησιμοποιήθηκε η προηγούμενη παραμετρική σχεδίαση (design) για τον υπολογισμό των εκπομπών NO<sub>x</sub>, CO και UHC αλλάζοντας κάθε φορά ένα scalar adaptation factor από -5% έως +5% και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την υγιή μηχανή. Τα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζονται δείχνουν την ποσοστιαία μεταβολή των εκπομπών σε σχέση με την μεταβολή του κάθε scalar adaptation factor.



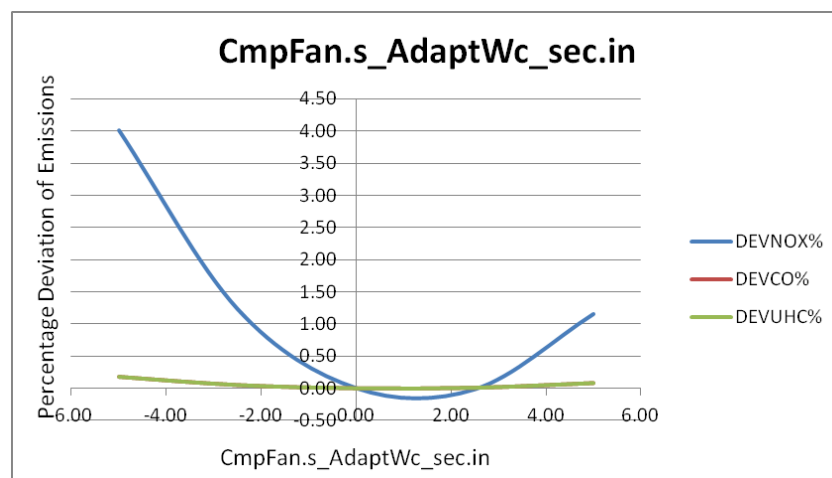
Σχήμα 7.6: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SE2



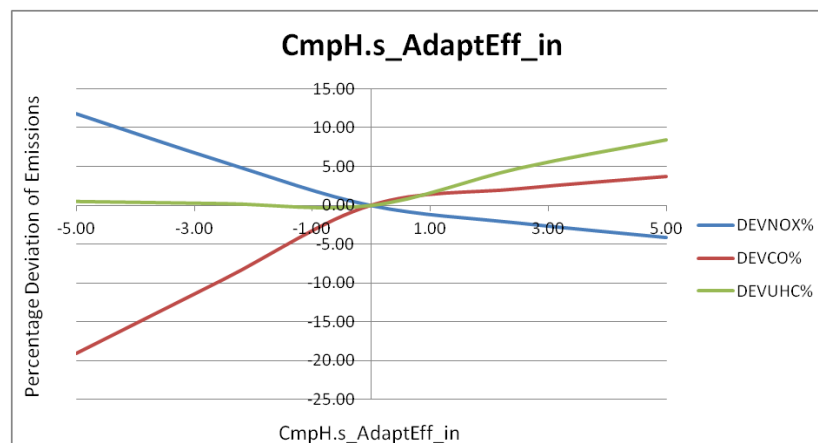
Σχήμα 7.7: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SE12



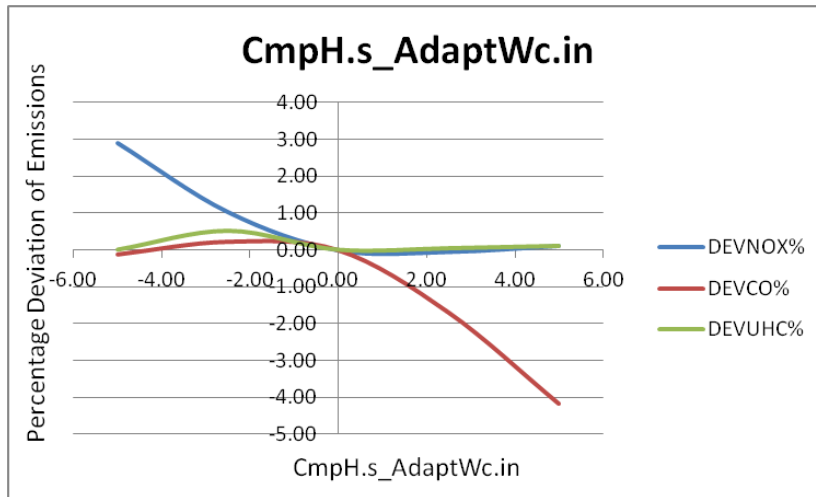
Σχήμα 7.8: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SW2



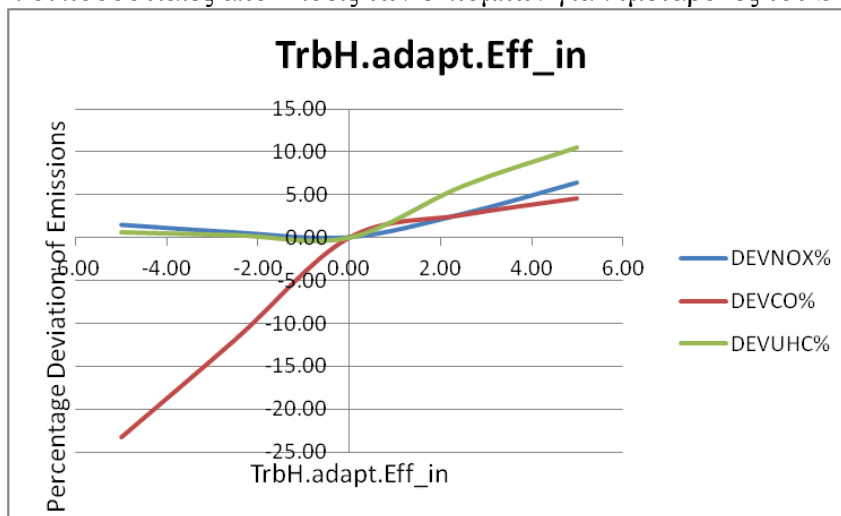
Σχήμα 7.9: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SW12



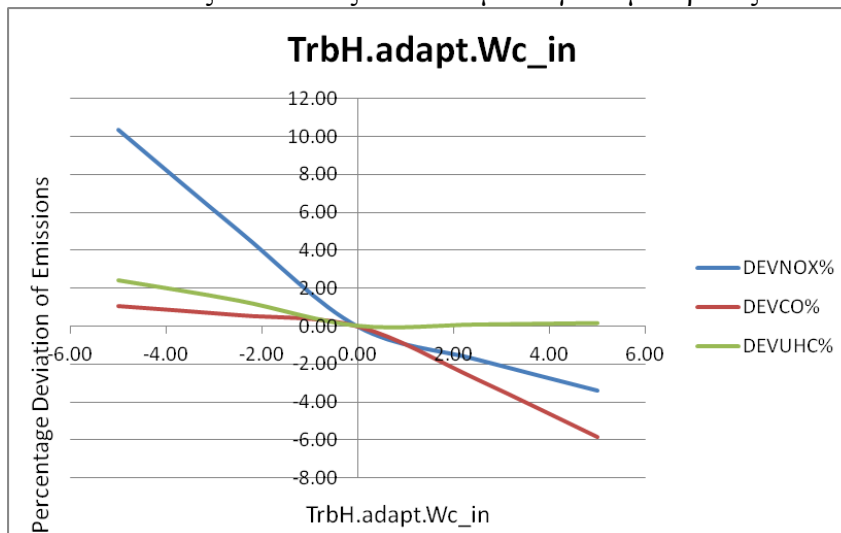
Σχήμα 7.10: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SE3



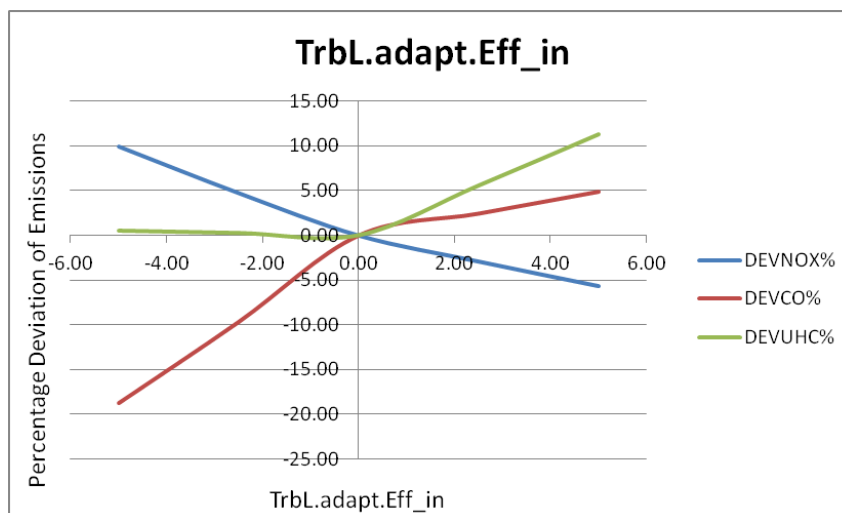
Σχήμα 7.11: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SW3



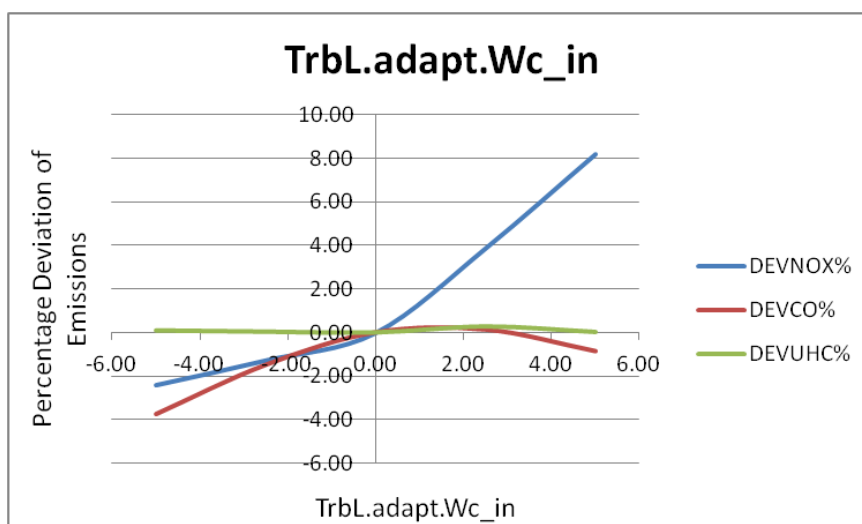
Σχήμα 7.12: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SE41



Σχήμα 7.13: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SW41



Σχήμα 7.14: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SE49



Σχήμα 7.15: οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των εκπομπών για %μεταβολές του SW49

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για βελτίωση της μηχανής έχουμε μείωση των NOX. Η μεταβολή των άκαυστων υδρογονανθράκων(UHC) για όλους τους adaptation factors από 0,95 έως 1 είναι σχεδόν μηδενική, δηλαδή το UHC δεν επηρεάζεται από τις μειώσεις των συντελεστών προσαρμογής. Ακόμη, γίνεται αντιληπτό ότι η συμπεριφορά των NOX για τις μεταβολές των περισσότερων συντελεστών προσαρμογής είναι αντιστρόφως ανάλογες με τη συμπεριφορά των CO. Αυτό το παρατηρούμε για μεταβολές των εξής συντελεστών: SE2, SE12, SW2, SE3, SE49. Βλέπουμε δηλαδή πως για τους συντελεστές κυρίως του FAN και του συμπιεστή υψηλής τα CO και NOX έχουν αντίθετη συμπεριφορά.

**7.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ**

Στην παράγραφο αυτή διερευνάται κατά πόσο μπορούν τα αποτελέσματα των καυσαερίων να χρησιμοποιηθούν για διαγνωστικούς σκοπούς. Αρχικά υπολογίζεται ο ιακωβιανός πίνακας 16x10 όπου 10 είναι οι συντελεστές προσαρμογής(adaptation factors) και 16 είναι τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν, για την εύρεση των καταλληλότερων συνδυασμών των μεγεθών αυτών έτσι ώστε να αποκτήσουμε την όσο το δυνατόν καλύτερη διάγνωση των συντελεστών προσαρμογής.

Οι συντελεστές προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 7-3. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν μία ανάλυση ευαισθησίας στην οποία μειώνοντας τον κάθε adaptation factor κατά 1% εμφανίζονταν οι επί τις εκατό μεταβολές των μεγεθών. Τα κελιά του ιακωβιανού πίνακα έχουν την μορφή  $dy_i/df_j$  όπου  $dy$  είναι οι επί τις εκατό μεταβολές των παραπάνω μεγεθών και  $df$  οι επί τις εκατό μεταβολές των συντελεστών προσαρμογής. Έτσι λοιπόν ο ιακωβιανός πίνακας είναι ο ακόλουθος:

Πίνακας 7-14: Ιακωβιανός πίνακας

jacobian	SE2	SE12	SW2	SW12	SE3	SW3	SE41	SW41	SE49	SW49
NL	-0.056	-0.345	0.0041	0.3277	-0.511	0.1209	-0.642	0.1051	-0.4006	-0.0215
NH	0.0305	0.021	0.0033	-0.0199	-0.535	0.3206	-0.696	0.2673	0.0225	-0.3245
Pt13	-0.031	-0.185	0.0021	0.092	-0.28	0.0664	-0.352	0.0577	-0.2184	-0.0126
Tt13	-0.009	0.0417	0.0006	-0.0225	-0.083	0.0197	-0.105	0.0172	-0.0642	-0.0042
Pt25	-0.027	-0.197	-0.0663	0.1873	-0.141	0.0325	-0.178	0.0284	-0.2284	0.071
Tt25	0.0694	-0.059	-0.0205	0.0557	-0.048	0.0114	-0.06	0.0099	-0.0677	0.018
Pt3	-0.041	-0.031	-0.0193	0.0289	-1.423	0.3561	-1.944	1.3146	-0.0408	-0.8361
Tt3	0.0626	-0.015	-0.0078	0.0147	0.1959	-0.0047	-0.412	0.3821	-0.0187	-0.1726
Pt45	-0.037	-0.05	-0.0144	0.0474	-1.081	0.2589	-1.355	0.2246	-0.0569	0.199
Tt45	0.0643	0.0026	0.0067	-0.002	1.0918	-0.2559	1.376	-0.221	0.0065	0.5997
Tt5	0.0763	0.0236	0.0094	-0.0214	1.3619	-0.3186	1.715	-0.273	0.2851	0.5636
FN	-0.107	-0.614	0.0032	0.3041	-1.176	0.2795	-1.477	0.2431	-0.6972	-0.197
CO	-0.087	0.0199	0.0104	-0.0191	-0.275	-0.0059	0.545	-1.973	0.0245	0.2337
NOX	0.0959	-0.04	-0.0216	0.0378	-0.216	0.1324	-1.509	1.2259	-0.0497	-0.6405
UHC	-0.133	0.0274	0.0138	-0.0264	-0.574	0.0429	0.597	-1.255	0.0334	0.2554
EPR	-0.005	-0.003	-0.0025	0.0031	-0.167	0.0408	-0.209	0.0355	0.0135	-0.103

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα το οποίο δέχεται σαν είσοδό τον παραπάνω ιακωβιανό πίνακα και υπολογίζει το condition number για κάθε πιθανό συνδυασμό. Όσο πιο μικρό είναι το condition number τόσο καλύτερο συνδυασμό έχουμε.

Στον Πίνακα 7-15 απεικονίζονται οι 4 καλύτεροι συνδυασμοί των μεγεθών αυτών και για τις 10 παραμέτρους υγείας, μια περίπτωση χωρίς μεγέθη εκπομπών καθώς και μία περίπτωση με μεγάλο condition number:

Πίνακας 7-15: Συνδυασμοί για τους 10 συντελεστές

ORDER	CONDITION										
1	58.60757	NL	NH	Pt13	Tt13	Pt25	Tt25	Tt3	Pt45	Tt45	CO
2	60.85152	NL	NH	Pt13	Tt13	Pt25	Tt25	Tt3	Pt45	CO	EPR
3	63.79168	NL	NH	Pt13	Tt13	Pt25	Tt25	Tt3	Pt45	CO	NOX
4	65.66978	NL	NH	Pt13	Tt13	Pt25	Tt25	Tt3	Pt45	Tt45	NOX
11	78.25468	NL	NH	Pt13	Tt13	Pt25	Tt25	Pt3	Tt3	Pt45	Tt45
78	783.15041	NL	NH	Tt13	Pt25	Tt3	Pt45	Tt45	Tt5	CO	NOX

Από τον Πίνακα 7-15 παρατηρούμε ότι οι στροφές, χαμηλές και υψηλές, καθώς και οι πιέσεις Pt13, Pt25 και οι θερμοκρασίες Tt13, Tt25 και Tt3 είναι απαραίτητες για να είναι το σύστημα καλά ορισμένο (well-conditioned, δηλαδή μικρό condition number). Όσον αφορά τους αέριους ρύπους, τα NOX και τα CO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαγνωστικούς σκοπούς, αλλά το UHC δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί γιατί οι μεταβολές του είναι πολύ μικρές όταν οι adaptation factors μειώνονται κάτω από τη μονάδα. Συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν τα UHC στους υπολογισμούς.

Στην συνέχεια όλοι οι συντελεστές προσαρμογής απόδοσης και παροχής πήραν τις τιμές 0.99 και 0.98 αντίστοιχα και για ώση στο 85% της ονομαστικής υπολογίστηκαν τα θερμοδυναμικά δεδομένα της μηχανής καθώς και οι εκπομπές των NOX και CO. Από τα δεδομένα που προέκυψαν έγινε προσπάθεια να εκτιμηθούν οι συντελεστές προσαρμογής για όλους τους συνδυασμούς του Πίνακα 7-15 και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 7-16: Αποτελέσματα των συντελεστών προσαρμογής

	3	4	11	78
SE2	0.99000000	0.99000001	0.99000000	0.99000000
SE12	0.98000001	0.98000002	0.99000000	0.98000000
SW2	0.99000000	0.98999999	0.98000002	0.99000000
SW12	0.98000001	0.98000001	0.98000000	0.98000000
SE3	0.99000000	0.99000000	0.99000000	0.98999999
SW3	0.99000000	0.99000000	0.98000001	0.99000000
SE41	0.98000002	0.98000002	0.99000000	0.98000001
SW41	0.98000000	0.98000000	0.98000001	0.98000000
SE49	0.99000000	0.98999999	0.98999999	0.99000000
SW49	0.98000001	0.98000001	0.98000001	0.98000000

Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές προσαρμογής για τους συνδυασμούς 3,4, 11 και 78 είναι αρκετά ικανοποιητικές. Για τους συνδυασμούς 1 και 2 όμως δεν μπορεί να λυθεί το σύστημα.

Στη συνέχεια για τους τρεις αυτούς συνδυασμούς έγινε προσπάθεια να ελεγχθεί αν και κατά πόσο επηρεάζονται οι τιμές των συντελεστών προσαρμογής αν



προσθέσουμε στις μετρήσεις των μεγεθών αυτών κάποιο θόρυβο. Τα όρια των επιτρεπόμενων ορίων του θορύβου βρίσκονται στον πίνακα:

Πίνακας 7-17: Όρια επιτρεπόμενου θορύβου

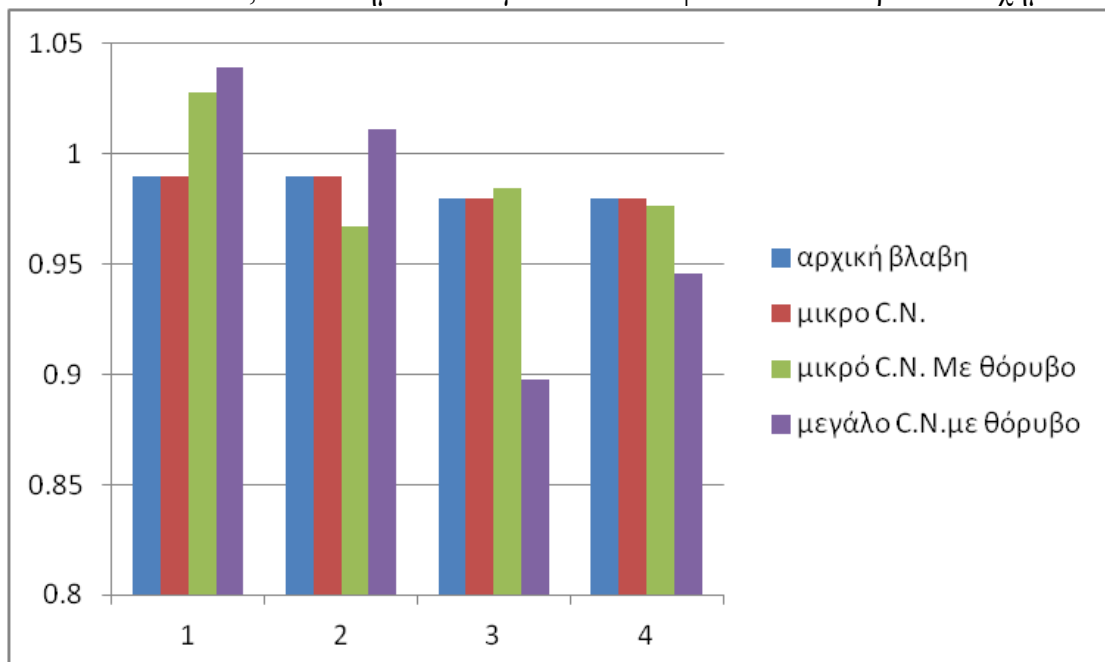
ΣΤΡΟΦΕΣ	NL, NH	0.10%
ΠΙΕΣΗ	Pt13, Pt25, PT3, Pt45	0.30%
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	Tt13, Tt25, Tt3, Tt45	0.25%
ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ	NOX, CO	0.20%

Έτσι λοιπόν οι ποσοστιαίες μεταβολές των συντελεστών προσαρμογής που προέκυψαν εξαιτίας της παρουσίας θορύβου για τις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις είναι οι εξής:

Πίνακας 7-18: Αποκλίσεις συντελεστών λόγω θορύβου

ORDER	3	4	11	78
RMS	0.666729	0.323255	0.848394	5.287106

Από τον Πίνακα 7-18 παρατηρούμε ότι μεταβολές είναι αρκετά μικρές με την εισαγωγή θορύβου ενώ αυξάνονται με την αύξηση του condition number. Όταν το condition number αυξάνεται έχουμε πολύ μεγάλες αποκλίσεις με την παρουσία θορύβου όπως στην παραπάνω περίπτωση με condition number=783.15041, δηλαδή το σύστημα δεν είναι ευσταθές. Σε άλλες μάλιστα περιπτώσεις με μεγάλο condition number=783.15041, το σύστημα δεν συγκλίνει. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7.16: δημιουργία αστάθειας για αύξηση του condition number

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για τους συντελεστές προσαρμογής του FAN, του συμπιεστή υψηλής και των στροβίλων.

**FAN**

Για το FAN, οι 4 καλύτεροι συνδυασμοί των μεγεθών που προέκυψαν έτσι ώστε το σύστημα να είναι καλά ορισμένο καθώς και ένας συνδυασμός με μεγάλο condition number είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 7-19: Συνδυασμοί για τους συντελεστές του FAN

ORDER	CONDITION				
1	11.22505	NL	Pt13	Pt25	Tt3
2	11.22542	NL	Pt13	Pt25	Brn.CO
3	11.282	NL	Pt13	Pt25	Brn.NOX
4	11.36101	NL	Pt13	Pt25	Tt25
765	907.74031	Pt25	Pt3	Tt5	Brn.NOX

Οι τιμές που προέκυψαν για τους συντελεστές προσαρμογής του FAN από τα θερμοδυναμικά δεδομένα είναι οι εξής:

Πίνακας 7-20: Αποτελέσματα των συντελεστών προσαρμογής

ORDER	1	2	3	4	765
SE12	0.990000033	0.990000250	0.990000061	0.990000008	0.989999997
SE2	0.989999965	0.989999944	0.989999962	0.989999968	0.989999993
SW12	0.980000007	0.980000025	0.980000010	0.980000005	0.980000021
SW2	0.979999992	0.979999990	0.979999991	0.979999992	0.980000008

Παρατηρούμε μεγάλη σύγκλιση των συντελεστών προσαρμογής σε όλες τις περιπτώσεις. Σε περίπτωση εισαγωγής θορύβου οι επί τις εκατό μεταβολές των συντελεστών προσαρμογής είναι:

Πίνακας 7-21: Αποκλίσεις συντελεστών λόγω θορύβου

ORDER	1	2	3	4	765
RMS	2.24	2.17	2.36	1.86	5.28

Εδώ βλέπουμε ότι η απόκλιση παραμένει περίπου σταθερή για είσοδο θορύβου στους τέσσερις πρώτους συνδυασμούς ενώ διπλασιάζεται για τον συνδυασμό με το υψηλό condition number. Πρέπει επίσης να τονισθεί πως επειδή το ποσοστό του θορύβου που υπεισέρχεται στις μετρήσεις είναι τυχαίο για κάθε συνδυασμό (μέσα πάντα στα όρια του Πίνακας 7-17) υπάρχει μια μικρή ανακρίβεια στα ποσοστά. Παρόλα αυτά φαίνεται να υπάρχει μία καλή συμπεριφορά των NOx και CO.

**COMP-H**

Αντίστοιχα για τον συμπιεστή υψηλής έχουμε:

Πίνακας 7-22: Συνδυασμοί για τους συντελεστές του συμπιεστή υψηλής

ORDER	CONDITION		
1	3.41865	Brn.CO	Brn.NOX
2	3.85794	Tt3	Brn.NOX
3	4.88784	NH	Brn.CO
4	6.31163	Pt13	Brn.NOX
5	6.54999	NL	NH
69	681.11317	NL	Pt25

Οι τιμές που προέκυψαν για τους συντελεστές προσαρμογής του συμπιεστή υψηλής από τα θερμοδυναμικά δεδομένα είναι οι εξής:

Πίνακας 7-23: Αποτελέσματα των συντελεστών προσαρμογής

ORDER	1	2	3	4	5	69
SE3	0.99	-	0.99	0.98999997	0.99000395	-
SW3	0.98	-	0.98	0.98000015	0.98000388	-

Ενώ με την εισαγωγή θορύβου έχουμε τις ακόλουθες ποσοστιαίες μεταβολές:

Πίνακας 7-24: Αποκλίσεις συντελεστών λόγω θορύβου

ORDER	1	2	3	4	5	69
RMS	0.18	-	0.13	2.87	1.5338652	-

Και σε αυτήν την περίπτωση βλέπουμε μια αύξηση της απόκλισης με την εισαγωγή του θορύβου καθώς αυξάνεται το condition number ενώ για πιο μεγάλα condition numbers η σύγκλιση είναι αδύνατη ή δεν βγαίνουν ρεαλιστικές τιμές. Βλέπουμε πως οι εκπομπές των NOX και CO μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να προσεγγισθούν οι συντελεστές προσαρμογής στον συμπιεστή υψηλής, με τα CO να παρουσιάζουν καλύτερη ευστάθεια.

**TURBINES**

Για την εκτίμηση των συντελεστών προσαρμογής των στροβίλων χαμηλής και υψηλής έχουμε τους παρακάτω συνδυασμούς, όπου πέρα από τους τέσσερις πρώτους συνδυασμούς και έναν με μεγάλο condition number, προστέθηκε ένας ακόμη συνδυασμός στον οποίο υπάρχουν τα NOX και CO, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά τους.

Πίνακας 7-25: : Συνδυασμοί για τους συντελεστές των στροβίλων

ORDER	CONDITION				
1	6.54405	NL	NH	Pt45	Brn.CO
2	7.06504	NL	Pt45	Tt45	Brn.CO
3	7.22225	NL	Tt3	Pt45	Tt45
4	8.04246	NL	Pt45	Tt45	Brn.NOX
6	8.48137	NL	Pt45	Brn.CO	Brn.NOX
252	991.04647	NL	NH	Pt3	Tt5

Οι τιμές που λαμβάνουν οι συντελεστές προσαρμογής για τους παραπάνω συνδυασμούς είναι:

Πίνακας 7-26: Αποτελέσματα των συντελεστών προσαρμογής

ORDER	1	3	4	6
SE41	0.98999982	0.99000000	0.99000000	0.99000000
SW41	0.97999926	0.98000000	0.98000000	0.97999999
SE49	0.98999997	0.99000000	0.99000000	0.99000000
SW49	0.97999999	0.98000000	0.98000000	0.98000000

Οι συνδυασμοί 1,3,4 και 6 συγκλίνουν με ικανοποιητικό βαθμό στις τιμές SE=0.99 και SW=0.98 ενώ οι συνδυασμοί 2 και 252 δεν μπορούν να συγκλίνουν σε κάποια τιμή. Παρακάτω φαίνονται οι αποκλίσεις των παραπάνω τεσσάρων συνδυασμών με την εισαγωγή θορύβου:

Πίνακας 7-27: Αποκλίσεις συντελεστών λόγω θορύβου

ORDER	1	2	3	4	6	252
RMS	-	-	0.323663	0.239862	0.262678	-

Για τους συνδυασμούς 3,4 και 6 παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις. Για τους στροβίλους παρατηρούμε ότι η παρουσία του CO στους δύο πρώτους συνδυασμούς έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να συγκλίνει το σύστημα. Αυτό δεν συμβαίνει για το

NOX, το οποίο στους συνδυασμούς που βρίσκεται παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα και με την παρουσία θορύβου.

### **NOX, CO**

Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια να βρεθούν οι καταλληλότεροι συνδυασμοί συντελεστών προσαρμογής που μπορούν να εκτιμηθούν με τη βοήθεια των NOX και CO. Οι συνδυασμοί με το μικρότερο condition number είναι οι εξής:

Πίνακας 7-28: Συνδυασμοί συντελεστών που μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση των NOx και CO

ORDER	CONDITION		
1	2.12191	SE3	SW49
2	2.70893	SE2	SE3
3	2.77722	SE2	SW3
4	3.13089	SE41	SW41
5	3.41865	SE3	SW3
6	4.86257	SE3	SE41
7	5.82515	SW41	SW49
8	6.44982	SE3	SE49
9	6.84828	SW3	SE49
10	7.091	SE3	SW41

Παρατηρούμε πως τα NOX και CO είναι πιο κατάλληλα για τον υπολογισμό των συντελεστών προσαρμογής του συμπιεστή υψηλής και των στροβίλων. Παρατηρούμε επίσης πως ο συντελεστής SE3 (scalar efficiency για τον συμπιεστή υψηλής) εμφανίζεται σε κάθε σχεδόν συνδυασμό που σημαίνει πως αποτελεί τον πιο κατάλληλο συντελεστή που μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια των NOX και CO.

Τέλος στην περίπτωση που δεν γνωρίζουμε τις τιμές των θερμοδυναμικών μεγεθών παρά μόνο τις χαμηλές και υψηλές στροφές, τα NOX και CO και την θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου χαμηλής, οι παράμετροι υγείας που είναι πιο κατάλληλοι να υπολογιστούν είναι:

Πίνακας 7-29: Συνδυασμοί συντελεστών που μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση των NL, NH, Tt5, NOx και CO

ORDER	CONDITION					
1	15.30669	SW12	SE3	SW3	SW41	SW49
2	15.3073	SE12	SE3	SW3	SW41	SW49
3	18.99687	SE3	SW3	SW41	SE49	SW49
4	19.91069	SE12	SE3	SW3	SE41	SW41
5	19.92925	SW12	SE3	SW3	SE41	SW41
6	22.19089	SE12	SW3	SW41	SE49	SW49
7	22.83489	SW12	SW3	SW41	SE49	SW49
8	24.29801	SE3	SW3	SE41	SW41	SE49
9	28.71811	SE2	SE12	SW3	SW41	SW49
10	28.72229	SE2	SW12	SW3	SW41	SW49

Στον παραπάνω πίνακα είναι φανερό πως μπορούν να υπολογιστούν οι περισσότεροι συντελεστές προσαρμογής της μηχανής ανάλογα με τον συνδυασμό που θα επιλεγεί.

# 8

## ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν τα καυσαέρια των αεριοστροβίλων που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου και στο περιβάλλον. Τα καυσαέρια αυτά είναι τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα, οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες και ο καπνός. Στην συνέχεια παρουσιάστηκαν οι μηχανισμοί σχηματισμού των ρυπαντών αυτών καθώς και οι μέθοδοι μείωσης τους. Ακόμη περιγράφηκαν οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την ποσοτικοποίηση των αέριων εκπομπών καθώς επίσης και οι αναγωγές στις οποίες πρέπει να αναχθούν οι μετρήσεις προκειμένου να καταστεί δυνατή η συσχέτισή τους.

Επιπλέον, αναφέρθηκαν οι βασικοί κανονισμοί που πρέπει να ακολουθηθούν πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διεξαγωγή μίας μέτρησης καυσαερίων. Παρουσιάστηκαν ακόμη τα βασικά όργανα που απαιτούνται για τη μέτρηση των αέριων εκπομπών καθώς και η διάταξή τους.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε μία συσκευή μέτρησης ρύπων η οποία είναι διαθέσιμη στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών. Περιγράφηκαν οι βασικές συνιστώσες της συσκευής και δόθηκαν οδηγίες ασφαλείας έτσι ώστε να προληφθούν λανθασμένες ενέργειες από τον χειριστή που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο τον ίδιο αλλά και την συσκευή. Ακόμη δόθηκαν οι απαιτούμενες πληροφορίες για την διεξαγωγή μίας σωστής, με βάση τους κανονισμούς, μέτρησης. Για την πιστοποίηση της συσκευής αυτής συλλέχτηκαν μετρήσεις για τα καυσαέρια ενός βιομηχανικού αεριοστροβίλου. Οι αποκλίσεις των μετρήσεων αυτών ήταν πολύ μικρές σε σχέση με τις μετρήσεις από τη μονάδα ελέγχου του αεριοστροβίλου.

Αναλύθηκε ακόμη ο τρόπος υπολογισμού του λόγου αέρα καύσης καθώς και του βαθμού απόδοσης του θαλάμου καύσης με την βοήθεια των καυσαερίων. Έχοντας δηλαδή τις περιεκτικότητες του οξυγόνου, του μονοξειδίου του άνθρακα, των άκαυστων υδρογονανθράκων και τον τύπο του καυσίμου μπορούμε να πάρουμε μία εκτίμηση για τις τιμές των μεγεθών αυτών.

Παρουσιάστηκαν ημιεμπειρικές σχέσεις εκτίμησης των οξειδίων του αζώτου, του μονοξειδίου του άνθρακα, των ακαύστων υδρογονανθράκων και του καπνού που υπάρχουν στην ανοικτή βιβλιογραφία, οι οποίες χρησιμοποιούν θερμοδυναμικά δεδομένα της μηχανής. Επειδή οι ημιεμπειρικές σχέσεις αναφέρονται σε συγκεκριμένους θαλάμους καύσης, είναι δύσκολο να εξάγουν ακριβή αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις. Για να γίνει χρήση των σχέσεων αυτών σε άλλες περιπτώσεις πρέπει να γίνει κατάλληλη προσαρμογή τους σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Για το σκοπό

αυτό περιγράφηκε κατάλληλη διαδικασία προσαρμογής. Περιγράφηκαν ακόμη, ειδικά για αεροπορικούς κινητήρες, μέθοδοι οι οποίες κάνουν χρήση των δεδομένων από την πιστοποίηση των αεροσκαφών (ICAO) για την εκτίμηση των παραπάνω εκπομπών. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των μεθόδων αυτών για μια αποστολή αεροσκάφους δίνοντας μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Ενώ συγκρινόμενες με προσαρμοσμένες ημιεμπειρικές σχέσεις στα παραπάνω δεδομένα οι αποκλίσεις ήταν πολύ μεγαλύτερες.

Οι παραπάνω ημιεμπειρικές σχέσεις και μέθοδοι μοντελοποιήθηκαν στη συνέχεια στο πρόγραμμα PROOSIS. Δημιουργήθηκε μία συνιστώσα ενός μοντέλου θαλάμου καύσης, η οποία έχει την δυνατότητα να υπολογίζει τις εκπομπές των καυσαερίων με όλες τις παραπάνω σχέσεις και μεθόδους. Το μοντέλο αυτού του θαλάμου καύσης χρησιμοποιήθηκε στην συνέχεια σε έναν αεροπορικό κινητήρα (turbofan διπλού τυμπάνου χωρίς ανάμειξη) αντικαθιστώντας τον θάλαμο καύσης που προϋπήρχε. Αρχικά έγινε μία παραμετρική ανάλυση, με παράμετρο την ώση του κινητήρα, όπου με αύξηση της ώσης παρατηρήθηκε αύξηση του δείκτη εκπομπών των NOx και μείωση των δεικτών CO και UHC όπως αναμένονταν. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μεταβολές των εκπομπών των καυσαερίων σε περίπτωση βλάβης σε κάποια συνιστώσα της μηχανής. Επίσης υπολογίστηκαν οι συνολικές εκπομπές για ένα LTO CYCLE τόσο για υγιή λειτουργία όσο και για λειτουργία με μεμονωμένη βλάβη σε κάποια από τις συνιστώσες της μηχανής αλλά και για την περίπτωση συνδυασμένων βλαβών.

Στη συνέχεια έγινε διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης των εκπομπών για διαγνωστικούς σκοπούς. Στα πλαίσια αυτά έγινε ανάλυση ευαισθησίας των εκπομπών σε μεταβολές των δεικτών υγείας του κινητήρα. Η ανάλυση αυτή επέτρεψε να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την καταλληλότητα συγκεκριμένων μετρήσεων για την εκτίμηση συγκεκριμένων δεικτών υγείας της μηχανής, τόσο σε επίπεδο συνιστώσας όσο και για ολόκληρη την μηχανή. Παρατηρείται ότι οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά από τις υπόλοιπες εκπομπές καυσαερίων για διαγνωστικούς σκοπούς για τον συμπίεστη υψηλής, ενώ οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου είναι πιο κατάλληλες για τη διάγνωση των στροβίλων. Για τη διάγνωση του FAN μπορούν εξίσου να χρησιμοποιηθούν και τα NOx και τα CO. Τέλος, για ολόκληρη την μηχανή μπορεί να γίνει χρήση του NOx ή του CO αντικαθιστώντας μια εκ των μετρήσεων της εξόδου του συμπίεστη υψηλής.



# 9

## Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- [1] ISO 11042-1 : 1996 ,“Gas Turbines-Exhaust Gas Emission . Part 1 : Measurement and Evaluation”.
- [2] Testo 350-MARITIME, Manual
- [3] AEROTEST, “EHM information that can best be obtained from emissions measurements”
- [4] NEPAIR, Final Technical Report, September 2003
- [5] K. Mathioudakis, A. Tsalavoutas, M. Kelaidis, N. Thoma, “CORRELATIONS ADAPTATION FOR OPTIMAL EMISSIONS PREDICTION”, May 2007
- [6] A. Alexiou, N. Aretakis, I. Roumeliotis, K. Mathioudakis, “Short and Long Range Mission Analysis for a Geared Turbofan with Active Core Technologies”
- [7] A. Alexiou, T. Tsalavoutas, PROOSIS Manual, “Introduction to Gas Turbine Modelling with PROOSIS”
- [8] N. Aretakis, K. Mathioudakis, A. Stamatis, “Identification of sensor faults on turbofan engines using pattern recognition techniques”
- [9] ICAO, Annex16, “AIRCRAFT ENGINE EMISSIONS”

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [10] ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ Γ., «ΠΗΓΕΣ, ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ»
- [11] ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ Κ. , «ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ, ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΑΙ ΗΧΟΥ», Αθήνα 2007
- [12] ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ Ν. , «ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι – Γενικές Αρχές» , Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ , Αθήνα 1991 .
- [13] ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ Κ., «ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ», Αθήνα 2007
- [14] ΓΚΟΛΙΑ Μ., «ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ»



# Π1

## LASER SPECTROSCOPY ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Πολλοί αναλυτές που βασίζονται σε οπτικές ή μη οπτικές τεχνικές για την εκτίμηση των αέριων εκπομπών έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν. Αυτοί οι αναλυτές πρέπει να εκπληρώνουν όσο καλύτερα γίνεται κάποιες παραμέτρους όπως υψηλή ευαισθησία και ικανότητα ανίχνευσης των συστατικών, αυτόματη λειτουργία, μικρό μέγεθος, μεγάλη αξιοπιστία, ευκολία χρήσης καθώς και άλλες παραμέτρους. Μία μέθοδος που ανταπεξέρχεται σε μεγάλο βαθμό στις παραπάνω παραμέτρους είναι η tunable diode laser absorption spectroscopy. Η TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) είναι μία τεχνική που μετράει την συγκέντρωση αέριων ρύπων όπως του μεθανίου, του CO, του NOx αλλά και άλλων εκπομπών. Στο παράρτημα αυτό θα παρουσιαστεί για τη μέθοδο αυτή ο βασικός τρόπος υπολογισμού της συγκέντρωσης των αέριων εκπομπών.

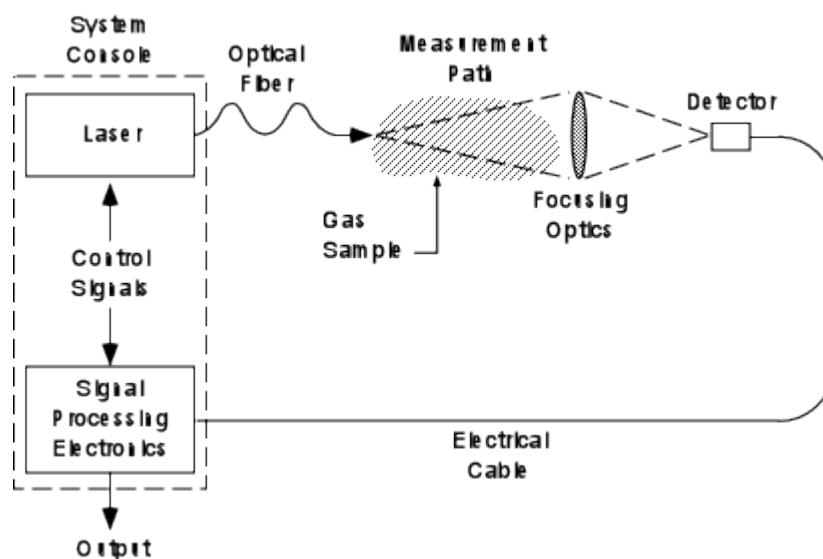
### Π1.1 Η ΤΕΧΝΙΚΗ TDLAS

Η βασική αρχή της τεχνικής αυτής είναι η εξής: τα αέρια μόρια απορροφούν ενέργεια από συγκεκριμένα μήκη κύματος στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Για μήκη κύματος ελάχιστα διαφορετικά από τη συγκεκριμένη γραμμή απορρόφησης δεν υπάρχει σημαντική απορρόφηση. Χρησιμοποιώντας λοιπόν μια ακτίνα φωτός (laser) και μεταδίδοντάς την στο δείγμα του καυσαερίου, συγχρονίζουμε το μήκος κύματος της ακτίνας του φωτός με το μήκος κύματος της συγκεκριμένης γραμμής απορρόφησης ενός αερίου του δείγματος και υπολογίζουμε την απορρόφηση αυτής της ακτίνας. Έτσι είναι δυνατό να συμπεράνουμε τη συγκέντρωση του συγκεκριμένου αερίου. Αυτή η μέτρηση μετράται συνήθως σε ppm.

Στα περισσότερα όργανα TDLAS, η ικανότητα γρήγορου συγχρονισμού του laser αξιοποιείται με ένα γρήγορο και επαναλαμβανόμενο σκανάρισμα του μήκους κύματος σε όλη τη γραμμή απορρόφησης του. Κατά τη διάρκεια του σκαναρίσματος αυτού, το ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος του laser το οποίο μεταδίδεται στο δείγμα του καυσαερίου ελέγχεται από έναν φωτοανιχνευτή (photodetector). Όταν το μήκος κύματος ρυθμίζεται να είναι έξω από τη γραμμή απορρόφησης, η μεταδιδόμενη ισχύς του laser είναι υψηλότερη απ' ό,τι όταν είναι μέσα στη γραμμή απορρόφησης. Η μέτρηση του σχετικού πλάτους της μετάδοσης έξω από την γραμμή απορρόφησης και μέσα στη

γραμμή απορρόφησης αποδίδει μια ακριβής μέτρηση της συγκέντρωσης του στοχευμένου αερίου από την ακτίνα του laser. Ακόμη, αρκετά όργανα TDLAS χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές όπως η Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) και η Balanced Ratiometric Detection (BRD) με αποτέλεσμα τα όργανα αυτά να είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην παραμικρή απορρόφηση της ισχύος του laser. Συνεπώς τα όργανα TDLAS έχουν υψηλή ευαισθησία στο να ανιχνεύουν τις συγκεντρώσεις αρκετών αερίων και μάλιστα με γρήγορη απόκριση. Παραδείγματα αερίων που μπορούν να ανιχνευθούν με την τεχνική TDLAS είναι τα ακόλουθα: NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, HCL, HCN, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.

Σε πολλές εφαρμογές του TDLAS, η ακτίνα του laser συνδέεται με οπτικές ίνες. Αυτό δίνει τη δυνατότητα διαχωρισμού του laser, των συνδεδεμένων ηλεκτρονικών και του μικροεπεξεργαστή με το σημείο των μετρήσεων. Έτσι έχουμε την ικανότητα να ελέγξουμε διεργασίες καύσης σε δύσκολα προσβάσιμα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Στην περίπτωση λοιπόν των οπτικών ινών, το όργανο χωρίζεται σε ξεχωριστά αλλά διασυνδεδεμένα συστατικά: το System Console και το Measurement Path τα οποία απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα: λειτουργία Laser με οπτικές ίνες

Η ακτίνα του laser προέρχεται από το System Console. Μια οπτική ίνα μεταφέρει την ακτίνα στο Measurement Path. Καθώς λοιπόν βγαίνει η ακτίνα από την οπτική ίνα εισέρχεται στο χώρο του δείγματος αερίου. Στο τέλος του Measurement Path η ακτίνα προσκρούει σε έναν φωτοανιχνευτή, ο οποίος μετατρέπει την ακτίνα και την πληροφορία που μεταφέρει, σε ένα ηλεκτρικό σήμα το οποίο επιστρέφει στο System Console μέσω ενός ηλεκτρικού καλωδίου. Στο System Console το ηλεκτρικό σήμα επεξεργάζεται και μας δίνει τη συγκέντρωση του συγκεκριμένου δείγματος αερίου.