

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

*ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2019-2020*

*ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ*

**Νίκος Νικολόπουλος 04104**

*Εισηγητής: Κουμπογιάννης Δημήτριος*



**Διπλωματική Εργασία**

*Θέμα:*

**“Δυνατότητες, προοπτικές και εφαρμογές  
της χρήσης βιοκαυσίμων σε  
μικροστροβίλους”**

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
ΚΕΦ 1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Αεριοστροβιλικά Συστήματα- Μικροστρόβιλοι.....	7
1.2 Μικροστρόβιλος Απλού Αξονα.....	8
1.3 Μικροστρόβιλος Απλού Αξονα Με Ανακομιστή.....	9
1.4 Περιγραφή Πραγματικού Μικροστροβίλου.....	10
1.5 Χρήση Βιοκαυσίμων Σε Μικροστροβίλους.....	11
1.6 Ενδεικτικές Ερευνητικές Εργασίες Χρήσης Βιοκαυσίμων σε Μικροστροβίλους....	12
ΚΕΦ 2. Βιοκαύσιμα.....	15
2.1 Παραγωγή Ελαίων Από Απευθείας Επεξεργασία Λαχανικών.....	15
2.2 Βιοντίζελ.....	16
2.3 Βίο-Αιθανόλη.....	17
2.4 Βίο-Μεθανόλη.....	18
2.5 Βίο-Αέριο.....	18
2.6 Υδρογόνο (Hydrogen).....	19
2.7 Πιθανές Επιπτώσεις Κατά Την Αλλαγή Καύσιμου Αεριοστροβίλου Σε Βιοκαύσιμο.....	19
2.7.1 Οικονομικές Επιπτώσεις.....	19
2.7.2 Δυσκολία Ψεκασμού Των Βιοκαυσίμων.....	20
ΚΕΦ 3. Κύριοι Ρύποι Που Εκπέμπονται Από Θαλάμους Καύσης Αεριοστροβίλων.....	21
3.1 Μονοξείδιο Του Άνθρακα (CO).....	21
3.2 Οξείδια Του Θείου (SOx).....	22
3.3 Οξείδια Του Αζώτου (NOx).....	22
3.4 Ακαυστοι Υδρογονάνθρακες (UHC) & Καπνός.....	23
3.5 Διοξείδιο Του Άνθρακα (CO <sub>2</sub> ) Και Νερό (H <sub>2</sub> ).....	24
ΚΕΦ 4. Υπολογισμός επιδόσεων μικροστροβίλου στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του 25	
4.1 Αεριοστρόβιλος Απλού Αξονα.....	25
4.2 Μικροστρόβιλος Απλού Αξονα Με Ανακομιστή.....	28
4.3 Μεθοδολογία Εύρεσης Παραμέτρων Εγκατάστασης Συγκεκριμένου Μικροστρόβιλου.....	31
4.4 Περιγραφή Περίπτωσης Μελέτης.....	34

4.5	Υπολογισμοί επιδόσεων για διαφορά βιοκαύσιμα .....	35
ΚΕΦ 5.	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	37
5.1	Επίδραση Χρήσης Βιοκαυσίμων Στις Επιδόσεις Μικροστροβίλου .....	39
5.2	Αντικατάσταση συμβατικού υγρού καυσίμου από υγρά βιοκαύσιμα .....	41
5.3	Αντικατάσταση Συμβατικού Αερίου Καυσίμου Από Αέρια Βιοκαύσιμα .....	42
5.4	Σύγκριση της Επίδρασης Χρήσης Βιοκαυσίμου σε Μικροστρόβιλο (MGT) και σε Αεριοστρόβιλο Υψηλής Ισχύος (GT).....	44
5.4.1	Υγρά Καύσιμα.....	44
5.4.2	Αέρια Καύσιμα .....	45
5.5	Εξάρτηση Επιδόσεων Μικροστροβίλου από το Ποσοστό Ανάμιξης Diesel-Biodiesel 46	
5.6	Συμπεράσματα .....	47
	Βιβλιογραφικές Αναφορές .....	48

## Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΟΡΥΚΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΘΕΙΟ.....	22
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ C30 .....	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ C30 .....	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ 8 ΚΑΥΣΙΜΩΝ [1] .....	36
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ .....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ [12]. .....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%) ΥΓΡΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	42
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (%) ΑΕΡΙΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	43

## Εικόνες

ΕΙΚΟΝΑ 1–1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (T) – ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ (S) [2]	7
ΕΙΚΟΝΑ 1–2. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ [6]	9
ΕΙΚΟΝΑ 1–3. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΗΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ [7]	10
ΕΙΚΟΝΑ 1–4. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ ANSALDO ENERGIA [8]	10
ΕΙΚΟΝΑ 1–6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (FUEL VOLUMETRIC FLOW) ΜΕ ΤΗΝ ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ (CORRECTED POWER OUTPUT) ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΤΟΥ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ [11]	13
ΕΙΚΟΝΑ 2–1. ΠΡΩΤΕΣ ΎΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟ-ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ [16]	17
ΕΙΚΟΝΑ 3–1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO <sub>x</sub> , MASS FRACTION) ΜΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟ ΠΑΡΑΜΟΝΗΣ (RESIDENCE TIME) [19]	23
ΕΙΚΟΝΑ 4–1. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ. [6]	25
ΕΙΚΟΝΑ 4–2. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΗΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ [7]	28
ΕΙΚΟΝΑ 4–3. ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ MODEL C30, ΙΣΧΥΟΣ 30 KW ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΙΑΣ CAPSTONE [21]	34

## Σχήματα

ΣΧΗΜΑ 5–1. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ (Α) ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΤΙΤ ΚΑΙ (Β) ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ SFC ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΥ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ LHV ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ. ....	40
ΣΧΗΜΑ 5–2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ (Α) ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ-ΑΕΡΑ F ΚΑΙ (Β) ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ M <sub>c</sub> ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΚΑΤΩΤΕΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΥ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ LHV ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	40
ΣΧΗΜΑ 5–3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ-LHV, (Α) ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΚΑΙ (Β) ΧΩΡΙΣ, ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ-LHV (Α) ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΚΑΙ (Δ) ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ.....	41
ΣΧΗΜΑ 5–4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΥΓΡΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΜΕΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΣΤΟΝ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟ. ....	42
ΣΧΗΜΑ 5–5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΑΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ ΣΤΟΝ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟ .....	43
ΣΧΗΜΑ 5–6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΥΓΡΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΑΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ MGT NO REC ΚΑΙ GT.....	44
ΣΧΗΜΑ 5–7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΑΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ MGT NO REC ΚΑΙ GT.....	45
ΣΧΗΜΑ 5–8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΤ (Α), ΤΕΧ (Β), SFC (Γ) ΚΑΙ ΝΤΗ (Δ) ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΒΙΟDIESEL ΣΤΟ DIESEL A.....	46

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια μελετώνται ιδιαίτερα οι προοπτικές ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αφού η χρήση των συμβατικών καυσίμων εγκυμονεί κινδύνους για το περιβάλλον και προξενεί άμεσα ή έμμεσα καταστροφικά φαινόμενα, όπως η ρύπανση των αστικών περιοχών, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η κλιματική αλλαγή, κτλ. Μεταξύ των σχεδίων που εφαρμόζονται για την αποτροπή ή και ελάττωση αυτών των φαινομένων από τις εκάστοτε κυβερνήσεις σε παγκόσμια κλίμακα, είναι και η στροφή προς άλλες μορφές ενέργειας. Τα βιοκαύσιμα, ως οικολογικά καύσιμα παρουσιάζουν αρκετά καλές προϋποθέσεις για τη χρήση τους σε μηχανές εσωτερικής καύσης συνεχούς ροής, όπως είναι τα συστήματα αεροστροβίλων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, μέσω μιας απλοποιημένης υπολογιστικής διαδικασίας, της επίδρασης της αντικατάστασης του συμβατικού καυσίμου με βιοκαύσιμο σε μικροστρόβιλο και ειδικότερα στη λειτουργική του συμπεριφορά, στο ονομαστικό του σημείο λειτουργίας. Κίνητρο για ενασχόληση με το θέμα είναι το γεγονός ότι η χρήση βιοκαυσίμου σε αεροστρόβιλο «τον κάνει πιο οικολογικό», αφού τα βιοκαύσιμα κατατάσσονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εργασία επικεντρώνεται στην κατηγορία των μικροστροβίλων. Μελετάται η επίδραση της χρήσης βιοκαυσίμου τόσο στην περίπτωση λειτουργίας μικροστροβίλου του εμπορίου με ανακομιστή όσο και χωρίς ανακομιστή. Επιπλέον, επιχειρείται σύγκριση με αντίστοιχη μελέτη που αφορά αεροστρόβιλο υψηλής ισχύος και έχει εκπονηθεί στο παρελθόν στο πλαίσιο πτυχιακής εργασία με τον ίδιο εισηγητή-επιβλέποντα. Τέλος, διατυπώνονται συμπεράσματα από τις παραπάνω συγκρίσεις για διάφορα είδη βιοκαυσίμων, υγρά και αέρια, καθώς και προτάσεις για συνέχιση της παρούσας ερευνητικής δουλειάς.

## **ΚΕΦ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Λόγω της αυξανόμενης παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από την καύση συμβατικών καυσίμων και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος (αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, φαινόμενο του θερμοκηπίου κ.ά.), υπάρχει έντονο ενδιαφέρον γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Στις τελευταίες συγκαταλέγονται και τα βιοκαύσιμα που μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα σε διάφορες εφαρμογές προάγοντας την «πράσινη» ενέργεια, αφού παράγουν λιγότερους ρύπους και είναι καύσιμα αναγεννητικής μορφής. Για τους παραπάνω λόγους, υπάρχει κίνητρο για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τη χρήση βιοκαυσίμων σε θερμικές μηχανές.

Βασικό είδος θερμικής μηχανής είναι και ο αεριοστροβίλος με πλήθος εφαρμογών (αεριοθούμενα, επίγειες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας). Ως επίγεια εγκατάσταση, παράγει μηχανική ισχύ σε στρεφόμενο άξονα και μετατρέπει την θερμική ενέργεια των καυσαερίων σε ηλεκτρική με τη βοήθεια γεννήτριας. Λόγω του ότι είναι μηχανή συνεχούς ροής (και συνεχόμενης ροής καυσίμου), κρίνεται ενδιαφέρουσα η τροφοδότηση τους με βιοκαύσιμα που εξυπηρετούν το σκοπό της μείωσης των αέριων ρύπων αλλά και τον πρωταρχικό σκοπό, που είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά τη χρήση βιοκαυσίμων σε εγκαταστάσεις μεγάλων αεριοστροβίλων (Heavy - Duty gas turbines), υπάρχει προηγούμενη μελέτη [1] (Πτυχιακή Εργασία Μ. Τουσμάνωφ), στην οποία εξήχθησαν κάποια συμπεράσματα που αφορούν την λειτουργική συμπεριφορά του αεριοστροβίλου στην περίπτωση αντικατάστασης του συμβατικού καυσίμου με βιοκαύσιμο. Το αντίστοιχο πρόβλημα απασχολεί και την παρούσα διπλωματική εργασία, εστιάζοντας στην περίπτωση μικροστροβίλου. Επειδή, συνήθως τα βιοκαύσιμα έχουν χαμηλότερη κατώτερη θερμογόνο ικανότητα (LHV) από τα συμβατικά καύσιμα, αν μία μηχανή τροφοδοτηθεί με ίδια ποσότητα βιοκαυσίμου αντί συμβατικού καυσίμου, θα επιτύχει μικρότερη τιμή μέγιστης θερμοκρασίας κύκλου (στην έξοδο του θαλάμου καύσης) και άρα μικρότερη παραγόμενη ισχύ. Αν όμως ως στόχος τεθεί το να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς της μηχανής, θα απαιτηθεί περισσότερο βιοκαύσιμο, δηλαδή για ίδια παροχή αέρα από το συμπιεστή θα απαιτηθεί μεγαλύτερος λόγος καυσίμου-αέρα. Το ποια θα είναι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, καθώς και αυτή της εξόδου καυσαερίων στο περιβάλλον και του θερμικού βαθμού απόδοσης της μηχανής είναι προς διερεύνηση. Η απαίτηση για μεγαλύτερη παροχή καυσίμου στην περίπτωση κατανάλωσης βιοκαυσίμου οδηγεί στην απαίτηση για τροποποίηση του συστήματος αποθήκευσης και τροφοδοσίας καυσίμου της μηχανής.

Στο υπόλοιπο εισαγωγικό Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στους μικροστροβίλους και στη βιβλιογραφία σχετικά με την εφαρμογή βιοκαυσίμων σε αυτούς.

Το Κεφάλαιο 2 αναφέρεται σε συνήθη βιοκαύσιμα, τόσο υγρά όσο και αέρια, τα οποία με βάση τη βιβλιογραφία είναι κατάλληλα για τροφοδότηση αεριοστροβιλικών μονάδων.

Το Κεφάλαιο 3 αφορά τους κύριους ρύπους που εκπέμπονται από μια εγκατάσταση αεριοστροβίλου ανάλογα με το καύσιμο τροφοδοσίας του.

Στη εργασία ενδιαφέρει η μελέτη της επίδρασης της αλλαγής καυσίμου, από συμβατικό σε βιοκαύσιμο, στην περίπτωση μικροστροβίλου και πως αυτό επηρεάζει τη λειτουργία του

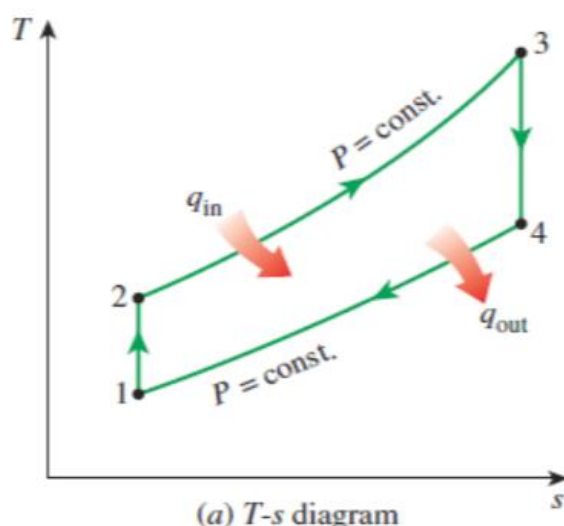
(κάτω από κάποιες παραδοχές). Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω υπολογιστικής προσομοίωσης της λειτουργίας του μικροστροβίλου, η οποία χρησιμοποιεί υπολογιστικό εργαλείο που προγραμματίστηκε σε Excel και το οποίο βασίζεται σε απλοποιημένο θερμοδυναμικό μοντέλο του μικροστροβίλου. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε μικροστροβίλος του εμπορίου, απλού άξονα με ανακομιστή θερμότητας. Προσομοιώνεται η λειτουργία του εμπορικού μικροστροβίλου για διάφορα βιοκαύσιμα, αλλά και συμβατικά καύσιμα, υγρά και αέρια. Όλα τα παραπάνω περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5.

Στο Κεφάλαιο 6 συγκρίνονται επιδόσεις και τιμές λειτουργικών παραμέτρων του μικροστροβίλου, όπως αυτές προκύπτουν από το υπολογιστικό εργαλείο για τα διάφορα βιοκαύσιμα, για λειτουργία με και χωρίς ανακομιστή θερμότητας. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση με αντίστοιχα αποτελέσματα από το [1], ώστε να αξιολογηθεί αν η επίδραση της αλλαγής συμβατικού καυσίμου σε βιοκαύσιμο στις επιδόσεις της μηχανής είναι διαφορετική για διαφορετικής ισχύος μηχανή και συγκεκριμένα για βιομηχανικό αεριοστρόβιλο έναντι μικροστροβίλου. Τέλος, μελετάται η επίδραση του ποσοστού βιοκαυσίμου στην περίπτωση που ο μικροστρόβιλος τροφοδοτείται με μίγμα υγρών καυσίμων, συμβατικού και βιοκαυσίμου (ντίζελ-βιοντίζελ).

## 1.1 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ- ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΟΙ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της χρήσης βιοκαυσίμων σε αεριοστρόβιλους μικρής ισχύος, που είναι ευρέως γνωστοί ως μικρο-αεριοστρόβιοι ή μικροστρόβιοι (micro gas turbines).

Οι αεριοστρόβιοι, ανεξαρτήτως μεγέθους και ισχύος, υλοποιούν τον θερμοδυναμικό κύκλο Brayton ή και παραλλαγές του. Ο απλός κύκλος Brayton αποδίδεται σχηματικά στην Εικόνα 1–1, όπου φαίνονται και οι θερμοδυναμικές μεταβολές που συμβαίνουν στο αέριο εργαζόμενο μέσο κατά τη διέλευσή του από τις βασικές συνιστώσες της εγκατάστασης που περιγράφονται στη συνέχεια.



Εικόνα 1–1. Διάγραμμα Θερμοκρασίας (T) – Ενθαλπίας (s) [2]

1-2 Ισεντροπική συμπίεση (αύξηση πίεσης του ρευστού στον συμπιεστή)

**2-3** Ισόθλιπτη πρόσδοση θερμότητας (εισαγωγή θερμικής ενέργειας στον κύκλο μέσω της καύσης του καυσίμου στον θάλαμο καύσης)

**3-4** Ισεντροπική εκτόνωση (εκτόνωση των καυσαερίων στα πτερύγια του στροβίλου)

**4-1** Ισόθλιπτη απόρριψη θερμότητας (έξοδος των καυσαερίων)

Υπάρχουν πολλών ειδών αεριοστροβίλοι για ποικίλες εφαρμογές, όμως οι περισσότερο διαδεδομένοι είναι είτε οι Αεριοστροβίλοι προώθησης αεροσκαφών (gas turbines propulsion engines) που χρησιμοποιούνται στην Αεροναυπηγική αλλά και οι Αεριοστροβίλοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (gas turbines power plants). Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν και οι μικροστροβίλοι (micro gas turbines) οι οποίοι είναι αεριοστροβίλοι πολύ μικρής ισχύος. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης των αεριοστροβίλων λαμβάνει τυπικά τιμές στο διάστημα 32–45 % [3] , με τις χαμηλές τιμές απόδοσης να ελαττώνονται περισσότερο, όσο χαμηλότερη είναι η ισχύς του μικροστροβίλου, ενώ τις υψηλές αποδόσεις αγγίζουν οι Αεριοστροβίλοι με την υψηλότερη ισχύ, που σε κλίμακα μπορεί να αγγίζουν ως και τα 500 MW σε Βιομηχανικού τύπου μονάδες που παράγονται από εταιρίες πρωτοπόρες στο είδος τους [4] .

Οι μικροστροβίλοι αποτελούν συστήματα παραγωγής καυσαερίων μέσω του θαλάμου καύσης και εκτόνωσης τους στον στροβίλο που διαθέτουν για την παραγωγή μηχανικού έργου και στη συνέχεια ηλεκτρικής ισχύος. Συναντώνται σε μεγάλο εύρος περιοχών ισχύος που διαφέρει όσον αφορά τη βιβλιογραφία. Οι πιο συχνές περιοχές ισχύος που καλύπτονται από μικροστροβίλους του εμπορίου είναι 30-400 kW, 30-330 kW, 25-500 kW, 15-300 kW, 30-100 kW, 10-200 kW κ.ά. Σχετικά με τις λειτουργικές τους διαφοροποιήσεις, μπορούν να αναφερθούν οι ακόλουθες κατηγορίες μικροστροβίλων [5] :

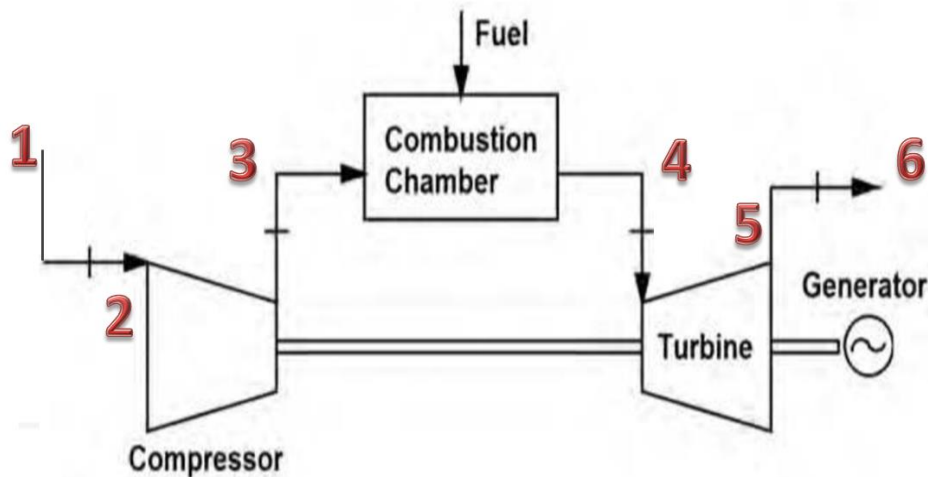
- Μονοβάθμιας συμπίεσης και εκτόνωσης.
- Με μη-ψυχόμενα πτερύγια στροβίλου.
- Χαμηλού λόγου πίεσης (έως 4).
- Χαμηλής θερμοκρασίας εισαγωγής στο στροβίλο (κάτω από 1000 °C)
- Με ανακομιστή θερμότητας για την προθέρμανση του αέρα μέσω της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων.

Οι μικροστροβίλοι είναι κατά κανόνα εύκολοι στο χειρισμό τους, παράγουν χαμηλά επίπεδα θορύβου και δεν εμφανίζουν πολλούς κραδασμούς κατά τη λειτουργία τους. Συνήθως είναι απλού άξονα, δηλαδή οι στροβιλομηχανές τους είναι συνδεδεμένες σε κοινή άτρακτο και αποτελούν συσκευές ακτινικής ροής που περιστρέφονται με περιστροφικές ταχύτητες της τάξης των 90.000-120.000 στροφών ανά λεπτό (rpm) [5]

## **1.2 ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ**

Ο μικροστροβίλος ενός άξονα είναι η πιο απλή διάταξη που μπορούμε να συναντήσουμε. Αποτελείται από τον συμπίεστή, τον στροβίλο και τη γεννήτρια τα οποία είναι συνδεδεμένα σε κοινή άτρακτο μεταξύ τους, καθώς και τον θάλαμο καύσης όπου επιτυγχάνεται η παραγωγή καυσαερίων μέσω της καύσης, τα καυσαέρια προσκρούουν στα πτερύγια του στροβίλου με αποτέλεσμα να τον περιστρέφουν.



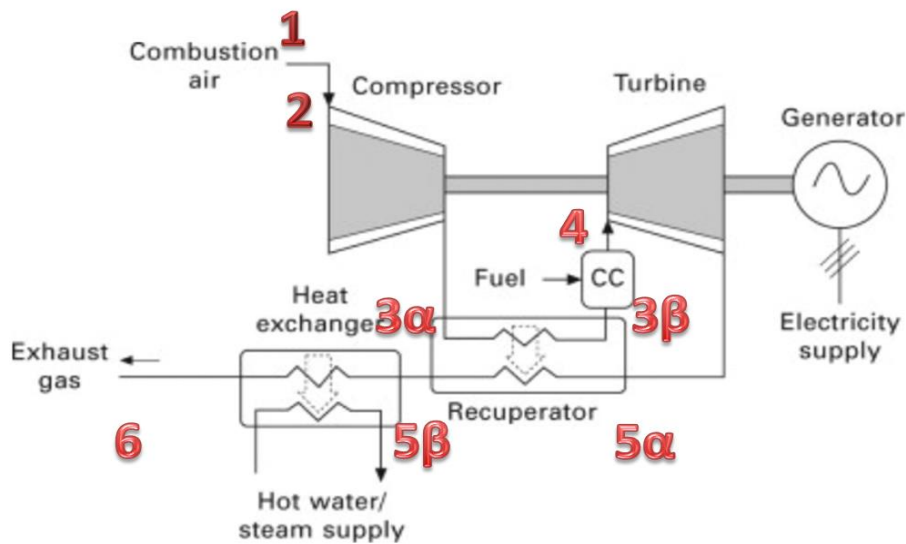


Εικόνα 1–2. Μικροστρόβιλος απλού άξονα [6]

Στην Εικόνα 1–2 απεικονίζεται σχηματικά ένας μικροστρόβιλος απλού άξονα, η λειτουργία του οποίου περιγράφεται ως εξής: Με ηλεκτρικό εκκινητή (μίζα) τίθεται σε λειτουργία ο συμπιεστής (Compressor) ο οποίος αναρροφά αέρα από το περιβάλλον και μέσω της κατασκευής των πτερυγίων του αυξάνει την πίεση του αναρροφώμενου αέρα και τον συμπιέζει. Έπειτα, ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται εντός του θαλάμου καύσης (Combustion Chamber) σε συνδυασμό με το καύσιμο (fuel) όπου συμβαίνει η ανάφλεξη του μίγματος και συνεπώς η παραγωγή καυσαερίων. Η χημική ενέργεια του καυσίμου μέσω της καύσης μετατρέπεται σε θερμική και κινητική ενέργεια η οποία προσδίδεται στα καυσαέρια. Τα καυσαέρια, τώρα, έχοντας υψηλή τιμή ενθαλπίας και αρκετά συμπιεσμένα προσκρούουν στα πτερύγια του στροβίλου (Turbine) εκτονώνονται και μετατρέπουν ένα μεγάλο μέρος της θερμικής και κινητικής τους ενέργειας σε περιστροφική ενέργεια που μεταφέρεται στον άξονα της εγκατάστασης. Ένα μέρος αυτού του έργου προσδίδεται στον συμπιεστή εξασφαλίζοντας την κίνηση του ενώ το υπόλοιπο έργο που παράγεται θεωρείται ωφέλιμο αφού είναι υπεύθυνο για την κίνηση του άξονα της γεννήτριας (Generator) και ακολούθως της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, τα καυσαέρια αφού εξέλθουν από τον στρόβιλο απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα «απαλλαγμένα» από ένα μεγάλο μέρος της υψηλής θερμικής τους ενέργειας.

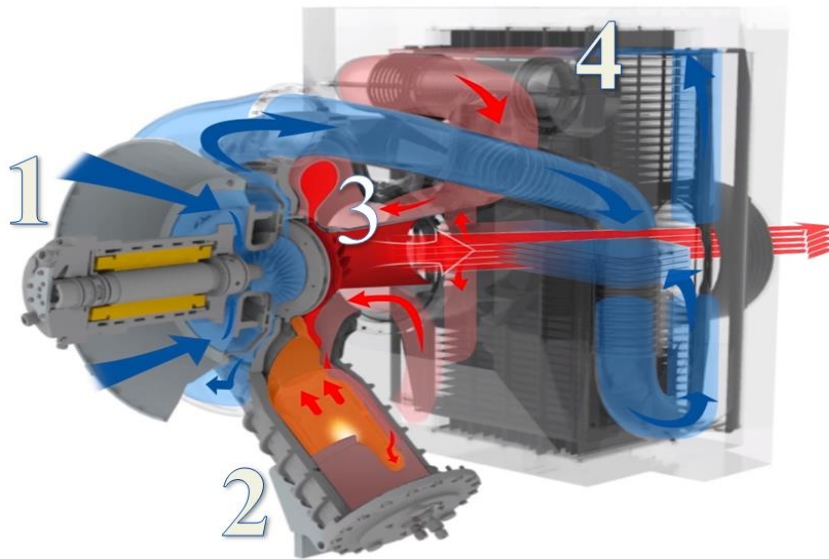
### **1.3 ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ**

Στην Εικόνα 1–3 απεικονίζεται διάταξη μικροστρόβιλου απλού άξονα με ανακομιστή, όπου λαμβάνει χώρα η διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή τα καυσαέρια δεν απορρίπτονται κατευθείαν στην ατμόσφαιρα αλλά αξιοποιείται ακόμα ένα μέρος της θερμικής τους ενέργειας με τη βοήθεια του ανακομιστή (recuperator), η οποία χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα πριν αυτός εισέλθει στο θάλαμο καύσης. Στην ίδια εικόνα, εμφανίζεται και ένας επιπλέον εναλλάκτης θερμότητας (Heat exchanger), που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης πριν την εξαγωγή των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, στο πλαίσιο της δυνατότητας λειτουργίας της εγκατάστασης ως διάταξης συμπαραγωγής.



Εικόνα 1–3. Μικροστρόβιλος απλής ατράκτου με ανακομιστή [7]

#### 1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ



Εικόνα 1–4. Μικροστρόβιλος με ανακομιστή της Εταιρείας Ansaldo Energia [8]

Στην Εικόνα 1–4 παρουσιάζεται πραγματικός μικροστρόβιλος του εμπορίου και συγκεκριμένα της Εταιρείας Ansaldo Energia. Παρατηρούμε πόσο συμπαγή και δομημένα είναι τα επιμέρους στοιχεία του. Πρόκειται για ένα μικροστρόβιλο της τάξεως των 100 kW που μπορεί να στεγαστεί σε εξωτερικό ή εσωτερικό χώρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και θερμικής ενέργειας [8].

Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία της εν λόγω διάταξης. Στο συμπιεστή (1) αναρροφάται εξωτερικός αέρας περιβάλλοντος και συμπιέζεται σε πίεση 4,5 bar. Μέσω

αεραγωγού κατευθύνεται στον ανακομιστή θερμότητας (4). Οι μπλε κατευθυντήριες γραμμές δείχνουν την πορεία του αέρα πριν τον συμπιεστή και στη συνέχεια του συμπιεσμένου αέρα που περνά από τον ανακομιστή και καταλήγει στον θάλαμο καύσης (2). Ο θάλαμος καύσης δέχεται συνεχή ροή καυσίμου και συμπιεσμένου προθερμασμένου αέρα από τον ανακομιστή. Με την διατήρηση συγκεκριμένου λόγο καυσίμου-αέρα επιτυγχάνεται η καύση και η παραγωγή καυσαερίων. Τα καυσαέρια που εξέρχονται με μεγάλη ταχύτητα και υψηλή θερμοκρασία καταλήγουν στον στρόβιλο της εγκατάστασης (3) όπου και εκτονώνονται και παράγουν έργο περιστρέφοντας τον ρότορα της γεννήτριας που βρίσκεται στον ίδιο άξονα. Αφού τα καυσαέρια εκτονωθούν στον στρόβιλο, διέρχονται από τον ανακομιστή, όπου και προθερμαίνουν τον συμπιεσμένο αέρα πριν εισέλθει στον θάλαμο καύσης.

Η λειτουργία του ανακομιστή θερμότητας βασίζεται στην αντιστροφή του θερμού (καυσαέριο) και του ψυχρού ρευστού (συμπιεσμένος αέρας) στο εσωτερικό της συσκευής, με σκοπό τη μεταφορά θερμότητας από το πρώτο στο δεύτερο [9]. Η χρήση του ανακομιστή μειώνει την απώλεια καυσαερίων, διευκολύνει την καύση, εξοικονομεί καύσιμο και τελικά συμβάλλει στην επίτευξη μεγαλύτερης θερμικής απόδοσης του συνολικού συστήματος και αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Όταν αυξάνεται η μέγιστη θερμοκρασία είναι σημαντικό να έχει εξοπλιστεί ο στρόβιλος του μικροστρόβιλου με υλικά ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως ειδικά κεραμικά υλικά, ώστε να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση και φθορά που συμβαίνει από την παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Υπάρχουν αρκετά είδη ανακομιστών θερμότητας, όπως π.χ. ανακομιστές με αυλούς ή πλάκες [10].

## **1.5 ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ**

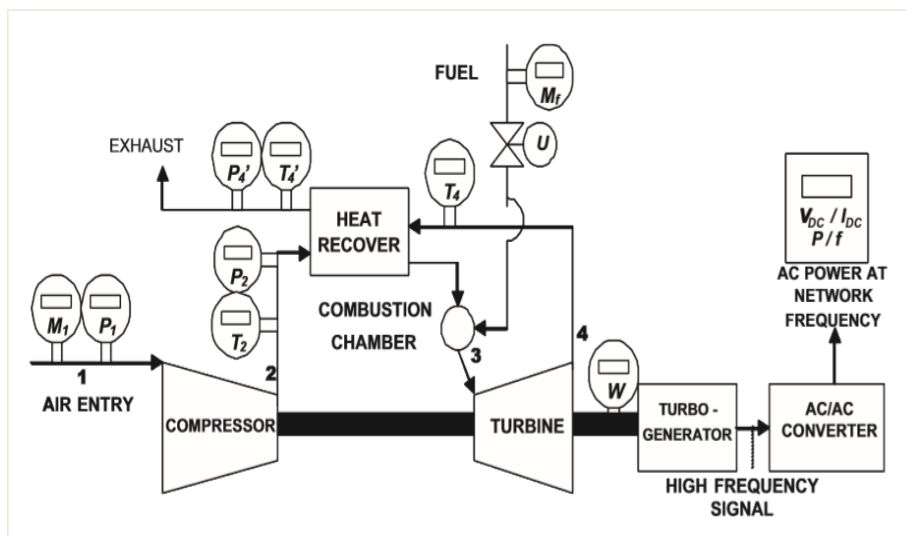
Οι μικροστρόβιλοι διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τις εγκαταστάσεις βιομηχανικών αεριοστρόβιλων υψηλής ισχύος (industrial gas turbines), λόγω του πολύ μικρού μεγέθους τους, της αξιοπιστίας τους και της δυνατότητας τους να αποτελούν αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, τα οποία αν χρειαστεί μπορούν να συνδυαστούν για την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος από ότι το καθένα ξεχωριστά. Οι μικροστρόβιλοι έχουν τα επιμέρους στοιχεία τους καλά δομημένα σε μικρό χώρο και αποτελούν συμπαγείς κατασκευές. Παρέχουν ευελιξία, έχει μειωμένα κόστη εγκατάστασης και ελάχιστα κόστη συντήρησης. Βρίσκουν αρκετές εφαρμογές κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συχνά σε σύμπραξη με θερμική ενέργεια. Αποτελούν καλή λύση για την αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένα μέρη ή απομονωμένες περιοχές από το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. νησιά) και σε πολλών ειδών εγκαταστάσεις, βιομηχανικές, κτιριακές, κτλ, ενώ συνδυάζονται εύκολα και με άλλες μονάδες παραγωγής ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, κτλ) στο πλαίσιο μικροδικτύων για τη διανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει και εξετάζεται ο συνδυασμός της τεχνολογίας τους με τη χρήση βιοκαυσίμων. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ενδιαφέρον στο θέμα, λόγω του ότι τα βιοκαύσιμα αποτελούν «πράσινη» μορφή ενέργειας με μειωμένους ρύπους. Ειδικότερα, αν οι μικροστρόβιλοι εγκατασταθούν κοντά σε σημεία παραγωγής βιοκαυσίμων ώστε να τροφοδοτούνται με αυτά, θα μπορέσουν να αποτελέσουν νησίδες παραγωγής «πράσινης» ενέργειας.

## 1.6 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει η χρήση βιοκαυσίμων σε μικροστρόβιλους συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των δύο τεχνολογιών, τα τελευταία χρόνια υπάρχει ολοένα και αυξανόμενο πλήθος σχετικών ερευνητικών εργασιών. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο σημείο αυτό δύο τέτοιες εργασίες που αφορούν την διερεύνηση της χρήσης βιοκαυσίμων σε μικροστρόβιλους.

### Μικροστρόβιλος τροφοδοτούμενος με Βιοντίζελ

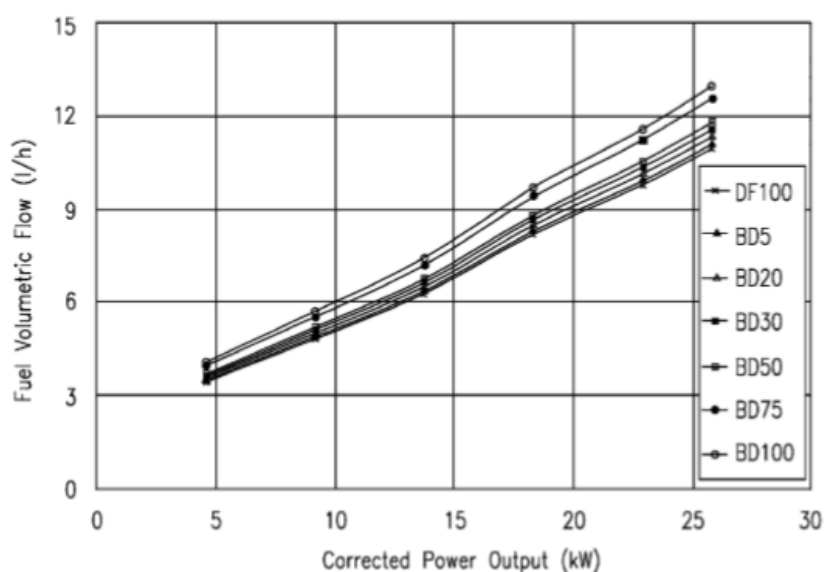
Στην πειραματική εργασία [11], μελετήθηκε η αλλαγή στις συνθήκες λειτουργίας όταν το κύριο καύσιμο λειτουργίας ενός εργαστηριακού μικροστρόβιλου ισχύος 30kW, το οποίο είναι το ντίζελ, αντικαθίσταται με το Βιοντίζελ, ένα οικολογικό καύσιμο προερχόμενο από έλαια, ανακυκλώσιμο και φιλικό προς περιβάλλον. Οι δοκιμές έγιναν τόσο σε ονομαστικό φορτίο όσο και σε μερικά φορτία του μικροστρόβιλου και με διαφορετικές συστάσεις καυσίμου κάθε φορά. Δηλαδή δοκιμάστηκε το BD100 που πρόκειται για Βιοντίζελ 100%, BD50 που πρόκειται για Βιοντίζελ 50% και Ντίζελ 50% και λοιπές συστάσεις άλλων περιεκτικότητων.



Εικόνα 1–5 Εργαστηριακός μικροστρόβιλος 30 kW [11]

Στην Εικόνα 1–5 παρουσιάζεται η μικροστρόβιλική εγκατάσταση. Οι δοκιμές έγιναν τόσο σε πραγματικές εργαστηριακές συνθήκες, όσο και σε υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης της λειτουργίας του μικροστρόβιλου, όπου χρησιμοποιήθηκαν ακριβώς οι ίδιες παράμετροι. Επειδή οι αεριστρόβιλοι, όπως και όλες οι θερμικές μηχανές, εμφανίζουν ευαισθησία στην αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος και γιαυτό τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν υπό σταθερές συνθήκες ISO, δηλαδή θερμοκρασία περιβάλλοντος 288,15 K (15 °C), ατμοσφαιρική πίεση 101,325 Pa (1,014 bar) και σχετική υγρασία 60%. Και στις εργαστηριακές δοκιμές, αλλά και στους υπολογισμούς, τηρήθηκε η ίδια ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του συστήματος σε κάθε φορτίο, οπότε το μόνο που άλλαξε ήταν οι παράμετροι που αφορούσαν την συμπεριφορά του καυσίμου για την ίδια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Συμπερασματικά, παρατηρήθηκε πως με χρήση BD100 (δηλαδή 100% Βιοντίζελ) υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου από ότι φαίνεται να καταναλώνει το σύστημα με την χρήση του Ντίζελ. Αυτό συμβαίνει διότι το Ντίζελ έχει υψηλότερη θερμογόνο ικανότητα (LHV) από το Βιοντίζελ άρα για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Όμως σε καύσιμα με χαμηλότερα ποσοστά άρα χαμηλότερες περιεκτικότητες Βιοντίζελ παρατηρήθηκε συμπεριφορά ίδια με του Ντίζελ όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1–6. Σε αυτήν παρατηρείται πως σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας της τάξεως των 26 kW στην έξοδο έχουμε κατανάλωση καυσίμου από το αμιγές Βιοντίζελ BD100 13 l/h και αντίστοιχη κατανάλωση καυσίμου στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του Ντίζελ 11 l/h, γεγονός που επιβεβαιώνει πως αυτή η αύξηση της κατανάλωσης οφείλεται στη μειωμένη Κατώτερη Θερμογόνο Ικανότητα (kJ/kg) του αμιγούς καυσίμου Βιοντίζελ BD100 συγκριτικά με το Ντίζελ. Όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων, το αμιγές Βιοντίζελ παρουσιάζει μειωμένες εκπομπές οξειδίων του Αζώτου (NOx) και διοξειδίου του Θείου (SO<sub>2</sub>), αλλά αυξημένες εκπομπές μονοξειδίου του Άνθρακα (CO), σε σύγκριση με το Ντίζελ ως κινητήριο καύσιμο. Τέλος, ως προς τις επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα των πτερυγίων του στροβίλου, παρατηρήθηκε η δημιουργία βλαβερών επικαθίσεων (fouling deposit) στο σώμα των πτερυγίων του στροβίλου το οποίο με τη σειρά του προκαλεί μείωση της απόδοσης του στροβίλου και αύξηση της πιθανότητας να καταστραφεί ο στροβίλος στην πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 1–6. Σύγκριση της ροής καυσίμου (Fuel Volumetric Flow) με την διορθωμένη ισχύ στην έξοδο (Corrected Power Output) σχετικά με τα ποσοστά του Βιοντίζελ [11]

#### Μικροστρόβιλος τροφοδοτούμενος με έλαιο σόγιας

Πειραματική εργασία που ασχολήθηκε με χρήση βιοκαυσίμου σε μικροστρόβιλο [12] και εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα. Ο εργαστηριακός μικροστρόβιλος με όνομα SR-30, ονομαστικής ισχύος 30kW, αρχικά ξεκίνησε την λειτουργία του στις 78,000 RPM με καθαρό πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο [ultra-low-sulfur-diesel (ULSD)] και στη συνέχεια αντικαταστάθηκε σταδιακά με μίγμα ελαίου σόγιας (βιοκαυσίμου soybean) μαζί

με το ULSD. Το κύριο καύσιμο που δοκιμάστηκε στην εργασία ήταν 75% Soybean-25%ULSD, ένα αρκετά υψηλής περιεκτικότητας καύσιμο σε βιοκαύσιμο.

Από τις δοκιμές που πραγματοποίησαν στο εργαστήριο, ο μικροστρόβιλος φάνηκε να βελτίωσε την απόδοση του με τη χρήση του μίγματος Soybean/ULSD, άλλα λόγω του σφάλματος των δοκιμών δεν ήταν αρκετά επιλήψιμη αυτή η αύξηση. Όσον αφορά την ανάφλεξη του καυσίμου και τον ψεκασμό του στον θάλαμο καύσης, υπήρχαν δυσκολίες οι οποίες μεγεθύνονταν όταν η περιεκτικότητα σε Soybean αυξανόταν και αυτό οφείλεται στην χαμηλή θερμογόνο ικανότητα (LHV) του καυσίμου συγκριτικά με αυτή του πετρελαίου. Ωστόσο, οι συγγραφείς θεωρούν ότι τα προβλήματα αυτά μπορούν να διορθωθούν με προθέρμανση του καυσίμου και ανάμιξή του προτού εισέλθει στον θάλαμο καύσης.

## **ΚΕΦ 2. ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ**

Με την σύμπραξη όλων των κρατών γίνεται μια στοχευμένη προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων (Greenhouse gases) που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς στην κλιματική αλλαγή. Το πρωτόκολλο του Κιότο που υιοθετήθηκε στο διεθνές συνέδριον όλων των Κρατών COP 7 και αφορούσε μια διεθνή συμφωνία για την επίτευξη του στόχου της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [13] καθώς και παρόμοια συνέδρια αλλά και άλλοι οργανισμοί, με αφορμή την περιβαλλοντική κρίση που βιώνουμε, ευαισθητοποιούνται και διεξάγουν πολλών ειδών δράσεις για την καταπολέμηση και αντιστροφή του φαινομένου που οδηγούν στην κλιματική αλλαγή και στις καταστροφές που επιφέρουν. Έτσι, λοιπόν, για την εκπλήρωση της συμφωνίας του Κιότο αλλά και έχοντας περιβαλλοντική συνείδηση χρησιμοποιούμε καύσιμα υγρά ή αέρια που προέρχονται από αεριοποίηση βιομάζας που έχουν την ικανότητα να καίγονται και να παράγουν μειωμένους ρύπους. Πιο συγκεκριμένα για να μιλήσουμε για την τροφοδότηση καυσίμων μικροστροβίλων μπορούμε να κάνουμε λόγο για συνθετικά καύσιμα κτλ τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν την ποσότητα των καυσαερίων που παράγουν από την απόληξη του συστήματος. Επίσης, επειδή ο θάλαμος καύσης των μικροστροβίλων απαιτεί συνεχή καύση του καυσίμου υπάρχει μεγάλη προοπτική τροφοδότησης των συστημάτων αυτών με εναλλακτικά καύσιμα, θα πρέπει όμως να γίνουν κάποιες ειδικές διαστασιολογήσεις στον θάλαμο καύσης ώστε το σύστημα να είναι συμβατό με το καύσιμο με οποίο θα τροφοδοτηθεί. Στη συνέχεια πρέπει να επιλεγεί καύσιμο είτε είναι υγρό είτε είναι αέριο για την τροφοδότηση του μικροστροβίλου βάσει κάποιων προδιαγραφών όπως την διαχυτικότητα του καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης, το πόσο γρήγορα εξατμίζεται για την καλύτερη δυνατή αναφλεξιμότητα, να προσαρμόζεται στις συνθήκες καύσης, στους ρύπους που παράγονται μετά την διαδικασία της καύσης του εναλλακτικού καυσίμου, στις φλόγες που παράγονται και στην στάχτη κατά τη διαδικασία καύσης αλλά και στις εκπομπές διοξειδίων του αζώτου NOx κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας του μικροστροβίλου. Τέλος, όλα τα παραπάνω πρέπει να διέπονται και από την βιωσιμότητα του συνολικού έργου δηλαδή την αφθονία του καυσίμου και την δυνατότητα παραγωγής του και επεξεργασίας του από την εκάστοτε Περιοχή/Χώρα που θα φιλοξενήσει το σύστημα μικροστροβίλων. Από την γκάμα βιοκαυσίμων που θα παραταθούν παρακάτω θα μπορέσουμε να επιλέξουμε ένα καύσιμο που θα τηρεί τις προδιαγραφές που αναφέραμε και θα εξυπηρετεί τον σκοπό για τον οποίο σχεδιάστηκε.

### **2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΛΑΙΩΝ ΑΠΟ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΑΧΑΝΙΚΩΝ**

Τα παραγόμενα λάδια από λαχανικά δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν απευθείας στον θάλαμο καύσης λόγω του μεγάλου ιξώδους του δηλαδή είναι πολύ παχύρρευστα και δυσκολεύονται στο να μετατραπούν σε αέρια εύκολα με τον ψεκασμό. Το πρόβλημα που έγκειται στα παραπάνω είναι η αδυναμία επιτυχίας τέλει καύσης λόγω του ότι δεν πετυχαίνεται το νέφος καυσίμου με τον ψεκασμό αλλά μεγαλύτερου τύπου σταγόνες πράγμα που καθιστά ακατάλληλο το καύσιμο στη διαδικασία της τέλει καύσης και ελαχιστοποιεί την απόδοση όλου του συστήματος. Οι λύσεις στο πρόβλημα που φαίνεται να υπάρχει είναι η προθέρμανση του καυσίμου πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης, ανάμιξη



του καυσίμου, trans-esterification και άλλα. Όπως προαναφέρθηκε ο υψηλός αριθμός ιξώδους των ελαίων που προέρχονται από λαχανικά που ανήκει εντός του εύρους των 30 με 200 cSt αν συγκριθεί με το αριθμό ιξώδους του πετρελαίου που αντιστοιχεί στον αριθμό των 2 cSt θα παρατηρηθεί πολύ μεγάλη διαφορά και θα επαληθευτεί η ακαταλληλότητα του καυσίμου των ελαιολαχανικών σε αυτή την κατάσταση που βρίσκονται πριν ληφθούν μέτρα. Η προθέρμανση του καυσίμου λοιπόν πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης πετυχαίνει την μείωση του ιξώδους και την καλή λειτουργία του καθώς είναι και μια φτηνή διεργασία αφού χρησιμοποιείται η θερμική ενέργεια των καυσαερίων μέσω εναλλάκτη θερμότητας πριν αυτά αφεθούν στην ατμόσφαιρα. Επόμενη διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί είναι η ανάμιξη του καυσίμου με άλλο καύσιμο πάλι για την μείωση του ιξώδους και την καλύτερη και πιο εύκολη αεριοποίηση του καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης. Αυτό το καύσιμο μελετάτε λόγω της μη τοξικότητας του και του γεγονότος ότι είναι βιοδιασπώμενο δηλαδή δεν αφήνει κατάλοιπα και είναι οικολογικό καύσιμο αφού σέβεται το περιβάλλον καθώς το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται ανακυκλώνεται με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. [14]

## **2.2 BIONTIZEA**

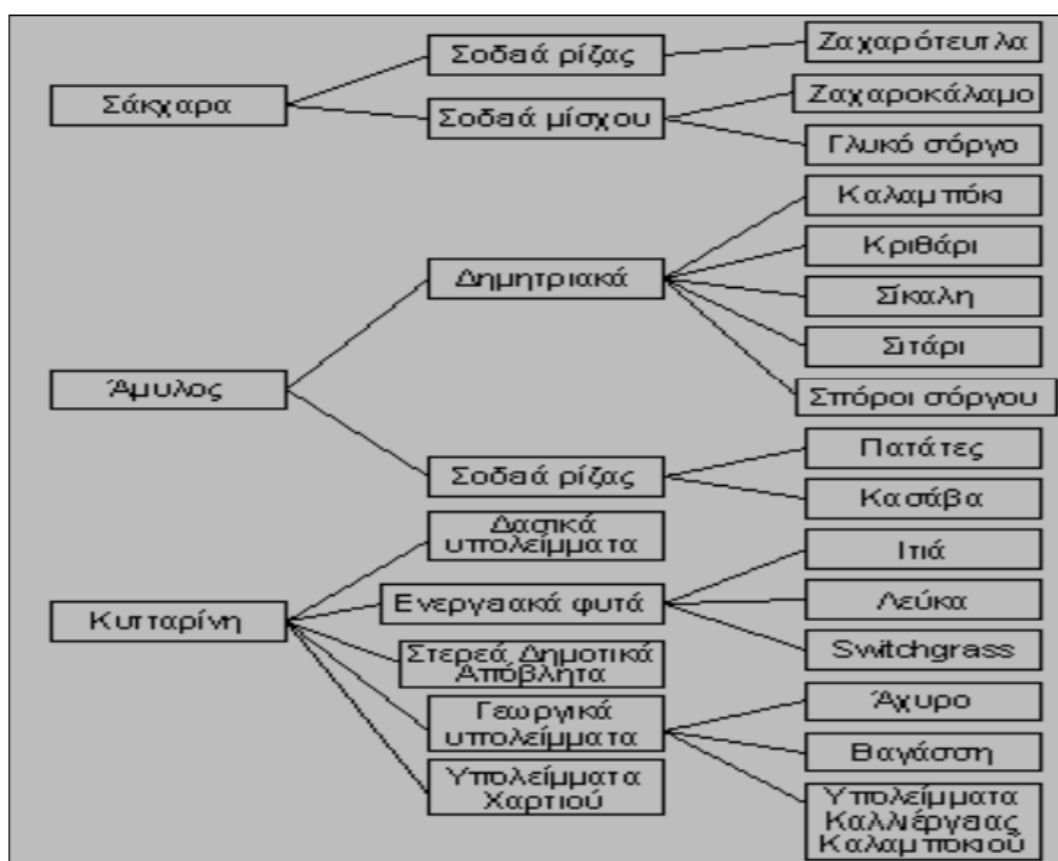
Το Βιοντίζελ παράγεται από μέσω της αξιοποίησης συγκεκριμένων χρησιμοποιημένων ελαίων τα οποία μπορεί να είναι είτε βρώσιμα είτε μη βρώσιμα. Όταν όμως χρησιμοποιούνται έλαια λαχανικών ή διαφόρων φυτών τότε το Βιοντίζελ είναι ένα πάρα πολύ οικολογικό καύσιμο και πολύ αποδοτικό για την καύση σε θάλαμο καύσης μικροστροβίλου. Με πολύ μικρές τροποποιήσεις το Βιοντίζελ, δηλαδή με εστεροποίηση και χημικό τρόπο διαμορφώνεται η δομή των μορίων του, παρουσιάζει ένα αντίστοιχο ιξώδες με το ντίζελ και με δεδομένο ότι κατά την καύση του παράγει πολύ μικρότερο αριθμό διοξειδίου του Θείου, το κάνει πάρα πολύ ανταγωνιστικό σε σχέση με το συμβατικό πετρέλαιο. Επίσης, μερικοί περιβαλλοντικοί λόγοι για να επιλέξουμε το Βιοντίζελ αντί του πετρελαίου είναι η πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε οξείδια του Αζώτου και μονοξείδιο του Άνθρακα, η χαμηλή περιεκτικότητα του σε αρωματικού υδρογονάνθρακες ενώ η υψηλή περιεκτικότητά του σε οξυγόνο το καθιστά κατάλληλο για την εξασφάλιση της τέλει καύσης η οποία δεν αφήνει κατάλοιπα στο περιβάλλον άρα είναι απολύτως οικολογικό και φιλικό προς το περιβάλλον που όλοι στοχεύουμε στη διατήρηση του. Ωστόσο, με τις τροποποιητικές μεθόδους που εφαρμόζονται το ιξώδες του μειώνεται και άλλο καθιστώντας το κατάλληλο για ψεκασμό στον θάλαμο καύσης εξασφαλίζοντας το νέφος καυσίμου που θέλουμε να επιτευχθεί ώστε εν συνεχεία να επιτευχθεί η τέλεια καύση και να εξασφαλιστεί η μέγιστη, κατά το δυνατόν, αποδοτικότητα του μικροστροβίλου. Οι μικροστροβίλοι που αναφερόμαστε είναι τις τάξης των 5-500 KW και η τροφοδότηση τους με Βιοντίζελ δεν επιφέρει κάποια σημαντική διαφορά σε ότι αφορά την συμπεριφορά του μικροστροβίλου σε κατάσταση λειτουργίας σε σχέση με το αν θα τροφοδοτούταν με συμβατικό καύσιμο και συγκεκριμένα με πετρέλαιο (ντίζελ). Το ιξώδες που παρουσιάζει το Βιοντίζελ είναι ανάλογο του προϊόντος του οποίου προήλθε, έτσι στη δεξαμενή του υπάρχει ένας προθερμαντήρας για την μείωση του ιξώδους πριν την είσοδο του στο θάλαμο καύσης και την επίτευξη μορφής νέφους από τον ψεκαστήρα (μπεκ) και την καλύτερη εξάτμιση του καυσίμου. Με το σχεδιασμό κατάλληλου ψεκαστήρα, ειδικού για καύσιμο που έχει αναμιχθεί (Βιοντίζελ και Αναμίξεις), πετυχαίνουμε τέλεια καύση με την σημαντική μείωση



του ιξώδους αλλά και καλύτερη εξάτμιση του καυσίμου, συνεπώς και λιγότερη παραγωγή οξειδίων του Αζώτου NOx. [15]

## 2.3 ΒΙΟ-ΑΙΘΑΝΟΛΗ

Η αιθανόλη προέρχεται από αλκοολική ζύμωση σακχάρων, αμυλούχων ουσιών, καλαμποκάλευρων και τα λοιπά. Η παραγωγική διαδικασία της αιθανόλης ξεκινά με την συλλογή των πρώτων υλών και με συγκεκριμένες διαδικασίες να αποσπαστούν τα σάκχαρα που στην περίπτωση μας είναι ωφέλιμα, όπως για παράδειγμα με την υδρόλυση. Στη συνέχεια αρχίζει η διαδικασία της ζύμωσης της πηγής του σακχάρου για την παραγωγή σακχαρούχου διαλύματος και τέλος ολοκληρώνεται με την διαδικασία της απόσταξης/διύλισης όπου παράγεται ένυδρη αιθανόλη στον βαθμό καθαρότητας που επιθυμούμε. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι πιο συγκεκριμένα αμυλούχες, σακχαρούχες και κυτταρινούχες δηλαδή προέρχονται από κυψέλες φυτών και φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 2–1. Η αιθανόλη είναι το πιο γνωστό και διαδεδομένο βιοκαύσιμο για οποιαδήποτε χρήση. [16]



Εικόνα 2–1. Πρώτες Ύλες για την παραγωγή Βίο-αιθανόλης [16]

## **2.4 ΒΙΟ-ΜΕΘΑΝΟΛΗ**

Η Βίο-Μεθανόλη προέρχεται κατά κύριο λόγο από τη διάσπαση του μεθυλεστέρα ή τον συνδυασμό εστέρα και μεθυλοξιδίνης του ουρανικού οξέως, το οποίο με τη σειρά του παράγεται από την διάσπαση συγκεκριμένου στοιχείου που απαρτίζεται από υλικό μέρους των φυτών. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να παραχθεί το συγκεκριμένο καύσιμο όπως με τη διαδικασία της πυρόλυσης. Πυρόλυση είναι μια διαδικασία όπου χρησιμοποιώντας ένας πυρολιτικό αντιδραστήρα παράγεται βίο-μεθανόλη από την καταλυτική αντίδραση του υδρογόνου και του μονοξειδίου του άνθρακα κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Μια άλλη διαδικασία είναι η αεριοποίηση της βιομάζας, όπου από την καύση της βιομάζας παράγεται συνθετικό καύσιμο και οδηγεί στον σχηματισμό της βίο-μεθανόλης. Η Βίο-Μεθανόλη είναι ένα βιοκαύσιμο το οποίο έχει την μεγαλύτερη προοπτική για την παραγωγή ενέργειας διότι είναι ένα καύσιμο που μπορεί να διανεμηθεί εύκολα. Έτσι, μερικές εφαρμογές που βρίσκει το συγκεκριμένο καύσιμο είναι σε κυψέλες καύσιμου αυτοκινήτων για τον λόγο του ότι μπορεί να αποθηκεύει και να διασπασθεί σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα με την θέρμανση αυτού. Επίσης, να αναφέρουμε πως η Βίο-Μεθανόλη είναι το πιο σύνηθες καύσιμο και την αποθήκευση του υδρογόνου αλλά μπορεί να αναμιχθεί και με τη βενζίνη όπως το M85 (όπου πρόκειται για 85% Μεθανόλη και 15% αμόλυβδη βενζίνη) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συμβατικά αυτοκίνητα χωρίς κάποια ιδιαίτερη τροποποίηση στο θάλαμο καύσης αλλά και στα περιφερειακά. Άλλες εφαρμογές, που μας ενδιαφέρουν και στην περίπτωση μας, είναι σε αεριοστροβίλους όπου η Βίο-Μεθανόλη είναι ένα καθαρό και πολύ αποδοτικό καύσιμο ώστε να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση για την τροφοδότηση αεριοστροβίλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η βίο-μεθανόλη όντας βίο-καύσιμο σαφώς και είναι φιλικό προς το περιβάλλον με αρκετά μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά όταν παράγεται από κάρβουνο τότε είναι και απαλλαγμένο από μονοξείδιο του θείου. [17]

## **2.5 ΒΙΟ-ΑΕΡΙΟ**

Το Βιοαέριο παράγεται φυσικά μέσω της αποσύνθεσης οργανικής ύλης η οποία απορρίπτεται. Κάνουμε, λοιπόν, λόγο για ένα βίο-καύσιμο που κυριολεκτικά παράγεται από απορρίμματα και άχρηστα οποιουδήποτε τύπου απόβλητα, άρα είναι καύσιμο πραγματικά βιώσιμο και χρήσιμο αφού παίρνει ζωή από άχρηστη ύλη καθώς είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγική διαδικασία του Βιοαερίου είναι υπολείμματα τροφών, απόβλητα εργοστασίων, αγροτικά- οικιακά απόβλητα όπως ουρία και κοπριά, κτλ. Η διαδικασία της ζύμωσης και της οργανικής αποσύνθεσης λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον όπου απουσιάζει το οξυγόνο και για αυτό το λόγο ονομάζεται αναερόβια χώνεψη. Στην αναερόβια χώνεψη απελευθερώνονται διάφορα αέρια αλλά κατά κύριο λόγο μεθάνιο σε ποσοστό 50-75% και διοξείδιο του άνθρακα. Το Βιοαέριο είναι πολύ εύφλεκτο παράγοντας μια βαθιά μπλε φλόγα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για πολλά ζητήματα, πχ Για εγκαταστάσεις Αεριοστροβίλων και πιο συγκεκριμένα μικροστροβίλους που μελετάμε στην παρούσα εργασία. Το Βιοαέριο, όπως και όλα τα βιοκαύσιμα, βοηθάει στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, όπου όπως όλα δείχνουν, θα εκλείψουν στον πλανήτη μας. Επίσης, ένας άλλος λόγος για την σημαντικότητα της παραγωγής του Βιοαερίου είναι τα αστικά και εργοστασιακά απόβλητα όπου απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες μεθανίου που είναι υπεύθυνο για την κλιματική

αλλαγή και το συμβάλλει κατά μεγάλο μέρος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το μεθάνιο έχει την ικανότητα να δεσμεύει 20-30 φορές περισσότερη θερμότητα από ότι το διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα της γης. Έτσι το Βιοαέριο αποθηκεύει το μεθάνιο και με φιάλες εισέρχεται στον οποιοδήποτε θάλαμο καύσης και μέσω της τέλει καύσης όλο το μεθάνιο μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα πράγμα το οποίο είναι περιβαλλοντικά πιο αποδεκτό όσον αφορά την μόλυνση του πλανήτη. [17]

## 2.6 ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HYDROGEN)

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως από την αεριοποίηση της βιομάζας, από ηλιακή απομόνωση, όπως καλείται, η διαδικασία με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας, την ηλεκτρόλυση κ.ά. Η διαδικασία παραγωγής του μέσω της αεριοποίησης της βιομάζας ακολουθείται από διπλή καταλυτική επεξεργασία. Στο πρώτο βήμα η βιομάζα αεριοποιείται και παράγεται το συνθετικό αέριο και εν συνεχεία υπέρθερμος ατμός της τάξεως των 700 – 1100 βαθμών Celsius χορηγείται εντός του προερχόμενου από βιομάζα συνθετικού αερίου και μας δίνει ως προϊόντα διοξείδιο του Άνθρακα και Υδρογόνο ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ ). Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύουμε το Υδρογόνο σε κυψέλες καυσίμου αφού το απομονώσουμε από το υπόλοιπο μείγμα και αυτός είναι ο ίσως ο φτηνότερος τρόπος για την παραγωγή του Υδρογόνου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ένας άλλος τρόπος που θα αναφέρουμε, όπως προείπαμε, είναι η ηλεκτρόλυση δηλαδή η διάσπαση του νερού σε διπλάσια κατιόντα υδρογόνου από ότι ανιόντα οξυγόνου με τη χρήση ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης μπορεί να έχει απόδοση μετατροπής ακόμα και 100% πράγμα που την καθιστά πάρα πολύ καλή μέθοδο παραγωγής Υδρογόνου. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει την δυνατότητα να μειώνει την ποσότητα των οξειδίων του αζώτου  $\text{NO}_x$  κατά την διαδικασία της καύσης σε αεριοστροβίλους και την προοδευτική αναβάθμιση της απόδοσης του συνολικού συστήματος αφού συμβάλλει η ταυτόχρονη παραγωγή του οξυγόνου. Το υδρογόνο είναι ένα από τα πιο εύκολα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγική διαδικασία και είναι ικανό να μην παράγει σχεδόν καθόλου ρύπους κατά την καύση του. Τέλος, η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του Υδρογόνου παίρνει τιμή της τάξεως των 120 MJ/kg δηλαδή την διπλάσια από ότι όλα τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα καθιστώντας το ηγέτη στην κατηγορία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αεριοστροβίλων και οποιασδήποτε άλλης χρήσης. Άρα θα πρέπει να διαστασιολογηθεί ο θάλαμος καύσης του αεριοστροβίλου κατά τι μικρότερος διότι ο χρόνος καύσης του υδρογόνου είναι πολύ γρηγορότερος από τα υπόλοιπα καύσιμα. [14]

## 2.7 ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΕ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟ

### 2.7.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα λόγω της Κατώτερης Θερμογόνου Ικανότητας (LHV) των περισσότερων βιοκαυσίμων που μελετήσαμε στην παρούσα εργασία η οποία είναι **χαμηλότερη** εκείνης των **συμβατικών καυσίμων** παρουσιάζεται το πρόβλημα της μη επαρκής καύσης ώστε να παραχθεί η ίδια ονομαστική ισχύς, έτσι χρειάζεται **περισσότερη αναλογία αέρα- καυσίμου**, πράγμα το οποίο σημαίνει πως πρέπει να

εισέλθει περισσότερο καύσιμο ώστε ο μικροστρόβιλος να κρίνεται αποδοτικός, άρα αυτό ερμηνεύεται σε σαφή αύξηση του κόστους του συνόλου της εγκατάστασης.

Επίσης, μπορεί να χρειαστεί **μετατροπή** και στο **σύστημα ψεκασμού** του αεριοστροβίλου λόγω του ότι αλλάζει το καύσιμο σε πιο παχύρευστο και με μεγαλύτερο ιξώδες αλλά και στη **διαστασιολόγηση** του **θαλάμου καύσης** και του **συστήματος ψεκασμού** διότι λόγω της χαμηλότερης Θερμογόνου Ικανότητας των βιοκαυσίμων θα χρειαστεί να **εγχέεται περισσότερος όγκος καυσίμου** και **αέρα** μέσα στο θάλαμο καύσης για να επιτύχουμε αποδόσεις που χρειάζονται για τη λειτουργία του μικροστροβίλου.

Μετά τη χρήση βιοκαυσίμου και συγκεκριμένα Βιοντίζελ (biodiesel) σε **εργαστηριακό μικροστρόβιλο** παρατηρήθηκε πως υπήρξε **συγκέντρωση απανθρακωμένου υλικού** στο εσωτερικό μέρος του μικροστροβίλου με αποτέλεσμα να υπάρχει υψηλός κίνδυνος **διάβρωσης των πτερυγίων του στροβίλου** της εγκατάστασης σε βάθος χρόνου και αρκετές ώρες λειτουργίας ώστε να χρειάζεται πιο ανθεκτικό υλικό κατασκευής των πτερυγίων και κατά συνέπεια επιπλέον κόστος του συνόλου του μικροστροβίλου.

### **2.7.2 ΔΥΣΚΟΛΙΑ ΨΕΚΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ**

Αρκετά υγρά **Βιοκαύσιμα** παρουσιάζουν **μεγάλο ιξώδες** σχετικά με αυτό που έχουν τα κοινά ορυκτά καύσιμα, τα οποία όμως έχουν υποστεί επεξεργασία και διύλιση. Πράγμα το οποίο σημαίνει πως είναι αρκετά **παχύρευστα** και έτσι υπάρχει **μεγάλη δυσκολία στον σωστό ψεκασμό** τους εντός του θαλάμου καύσης και κατά συνέπεια μεταφράζεται σε ατελή καύση η οποία με τη σειρά της παράγει μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων και προβλήματα εντός του θαλάμου καύσης καθώς και μειωμένη ισχύ. Ένα τέτοιο πρόβλημα αντιμετωπίζεται με προθέρμανση του βιοκαυσίμου πριν τον ψεκασμό του εντός του θαλάμου καύσης έτσι ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν οι μεγαλύτερες σταγόνες καυσίμου που δημιουργούν προβλήματα ή ακόμα και μετατροπή όλου του θαλάμου καύσης ώστε να πληροί τις προδιαγραφές του εκάστοτε βιοκαυσίμου. Τα οποία και δυο μεταφράζονται σε επιπλέον αύξηση του κόστους της εγκατάστασης. [5]

## **ΚΕΦ 3. ΚΥΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΘΑΛΑΜΟΥΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ**

Είναι εύλογο να μελετάμε τις διαδικασίες που πρέπει να λάβουν χώρα ώστε να μειώσουμε την κατανάλωση καυσίμου προς όφελος μας και την επίτευξη καλύτερων αποδόσεων οποιονδήποτε συστημάτων που αξιοποιούν ορυκτά καύσιμα συμβατικού τύπου είτε Βιοκαύσιμο αναγεννησιακού τύπου. Όμως είναι ακόμα σημαντικότερο να μειώσουμε τις εκπομπές των ρύπων για την διατήρηση του περιβάλλοντος, του οικοσυστήματος αλλά και όταν μπαίνει ο παράγοντας άνθρωπος στην μέση πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με τους ρύπους που απορρίπτουμε στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε με δομημένο και κατανοητό τρόπο την επίδραση των κύριων μορφών ατμοσφαιρικής ρύπανσης αλλά και επιβάρυνσης του ανθρώπινου οργανισμού από τους ρύπους που εξέρχονται από ένα σύστημα απόρριψης καυσαερίων αεριοστροβιλικής εγκατάστασης. Οι κύριοι ρύποι που παράγονται από τα ένα σύστημα καύσης αεριοστροβίλου είναι: το μονοξείδιο του Άνθρακα (CO), τα οξείδια του Θείου (SO<sub>2</sub>), τα οξείδια του Αζώτου (NO<sub>x</sub>), οι άκαυστοι Υδρογονάνθρακες (UHC) και ο καπνός καθώς και σε όλες τις καύσεις υδρογονανθράκων παρατηρείται διοξείδιο του Άνθρακα και Νερό (CO<sub>2</sub>) και (H<sub>2</sub>), αντίστοιχα. Τέλος, είναι σημαντικό να τονίσουμε πως κατά την εκκίνηση του συστήματος και στα μερικά φορτία παρατηρείται η μέγιστη περιεκτικότητα σε CO και UHC στα καυσαέρια, ενώ στις συνθήκες πλήρους λειτουργίας και ονομαστικών φορτίων παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση NO<sub>x</sub> και καπνού στα καυσαέρια απόρριψης.

### **3.1 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO)**

Γενικά, το Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO) είναι ένα άχρωμο, άγευστο, άοσμο αέριο το οποίο δεν έχει ερεθιστικό ύφος αλλά είναι απολύτως τοξικό και ασφυκτικό όσον αφορά την εισροή του στα ανθρώπινα πνευμόνια, πρόκειται για δηλητήριο το οποίο σε υψηλές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις μπορεί να οδηγήσει στον θάνατο. Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται από την ατελή καύση οποιουδήποτε καυσίμου το οποίο περιέχει μόρια άνθρακα στη δομή του. Άρα, τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα όπως και τα βιοκαύσιμα είναι υπεύθυνα για την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα τα οποία απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα μέσω των καυσαερίων που παράγουν. Ο σχηματισμός μονοξειδίου, λοιπόν, όπως προείπαμε βρίσκει τις μέγιστες τιμές του σε συνθήκες εκκίνησης και μερικών φορτίων και προκαλούνται όταν δεν υπάρχει η επιθυμητή περίσσεια οξυγόνου αλλά και ανεπαρκείς ρυθμοί καύσης στην κύρια ζώνη του θαλάμου καύσης. Επίσης, άλλοι παράγοντες μπορεί να είναι η μη καλή ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα οπότε δημιουργούνται υψηλές συγκεντρώσεις καυσίμου δεν επιτυγχάνεται η σωστή καύση, με αποτέλεσμα να απορρίπτονται άκαυστα στο περιβάλλον και ανοξειδωτο μίγμα αέρα καυσίμου και σε δημιουργία επικαθίσεων λεπτών στρωμάτων μίγματος αέρα – καυσίμου στην επιφάνεια που φαίνεται να έχει σβήσει η φλόγα και πρόκειται για την περισσότερη παγωμένη επιφάνεια του θαλάμου καύσης.

### 3.2 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ (SOx)

Τα οξειδία του Θείου (SOx) σχηματίζονται από την οξείδωση του Θείου το οποίο περιέχεται εντός του καυσίμου και είναι αναπόφευκτο να συμβεί οποιαδήποτε διαδικασία ακολουθήσει η καύση του καυσίμου. Ο μοναδικός τρόπος να μην παραχθούν τα οξειδία του Θείου είναι η απομάκρυνση του Θείου ως στοιχείο από το καύσιμο κατά την διύλιση του στα Διυλιστήρια. Τα ορυκτά συμβατικά καύσιμα περιέχουν σημαντικές ποσότητες Θείου που μετά την ολοκλήρωση της καύσης παράγουν τα βλαβερά οξειδία του Θείου που αποβαίνουν μοιραία για το περιβάλλον, τον άνθρωπο αλλά και για τα πτερόγια του στροβίλου καθώς είναι πολύ ισχυρό διαβρωτικό καταστρέφοντας τα. Η συντριπτική πλειοψηφία του Θείου αφού καεί παράγει διοξείδιο του Θείου (SO<sub>2</sub>) σε ποσοστό περίπου 97% το οποίο μετατρέπεται σε τριοξείδιο του Θείου (SO<sub>3</sub>) αφού απορριφθεί και παραμένει στην ατμόσφαιρα για την διάρκεια ενός 24ώρου. Παρατίθεται ο Πίνακας 3-1 όπου διακρίνουμε τις περιεκτικότητες Θείου στα διάφορα ορυκτά καύσιμα.

Πίνακας 3-1 Περιεκτικότητα Ορυκτών Καυσίμων σε Θείο

Καύσιμο	Περιεκτικότητα Θείου κ.ο. (%)
Γαϊάνθρακας	<10
Βαρύ Πετρέλαιο	0.5 - 4
Diesel	0.1 – 0.8
Κηροζίνη	0.01 – 0.1
Φυσικό Αέριο	<0.01

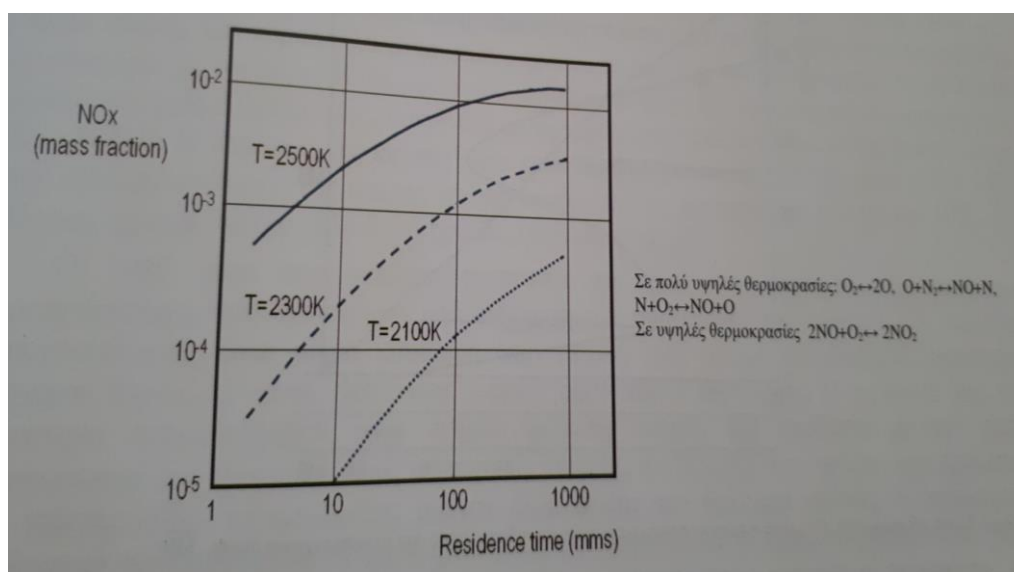
Από την άλλη μεριά, τα βιοκαύσιμα στο σύνολο τους εντοπίζονται χωρίς προσμίξεις Θείου στη μάζα τους, πράγμα το οποίο σημαίνει πως κατά την διαδικασία της καύσης τα βιοκαύσιμα δεν παρουσιάζουν καθόλου περιεκτικότητα οξειδίων του Θείου (SOx) στα καυσαέρια. Αυτή είναι μια πολύ καλή περιβαλλοντικά αιτία χρήσης βιοκαυσίμων έναντι συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Να προσθέσουμε, τέλος, πως ούτε η Βενζίνη, αν και είναι συμβατικό καύσιμο, περιέχει Θείο όπως τα υπόλοιπα που παρατέθηκαν παραπάνω και χρειάζεται να δαπανηθούν σημαντικά χρηματικά ποσά για την απομάκρυνση του Θείου από αυτά.

### 3.3 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NOx)

Τα οξειδία του Αζώτου (NOx) που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα ως προϊόντα καύσης προέρχονται από την διάσπαση του Αζώτου (N<sub>2</sub>) που εμπεριέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και του Οξυγόνου (O<sub>2</sub>) και μετατρέπονται σε N και O, αυτό οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εντός του θαλάμου καύσης και διατηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια της πλήρους φόρτισης. Οι αλυσιδωτές αντιδράσεις μετά την διάσπαση των μορίων σχηματίζουν συγκεκριμένες χημικές ενώσεις από τις οποίες οι περισσότερο επιλήψιμες είναι το NO μονοξείδιο Αζώτου και διοξείδιο του Αζώτου (NO<sub>2</sub>) όπου και βρίσκονται στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις και αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην ατμοσφαιρική ρύπανση, με ονομασία θερμικά οξειδία του Αζώτου (NOx). Όπως θα δούμε



στην Εικόνα 3–1 η περιεκτικότητα των οξειδίων του Αζώτου μειώνεται σημαντικά όταν μειωθεί ο χρόνος παραμονής των μορίων εντός του θαλάμου καύσης και μειωθεί η θερμοκρασία καύσης, περίπου κάτω των 2000 K (1727 °C). Είναι σαφές πως η παραγωγή των οξειδίων του Αζώτου γίνεται στην πρώτη ζώνη του θαλάμου καύσης και μεγιστοποιείται η συγκέντρωσή τους σε συνθήκες ονομαστικής λειτουργίας, δηλαδή σε πλήρη φόρτιση του συστήματος. Περιβαλλοντικά, συμβάλλουν στην καταστροφή του στρώματος του Όζοντος το οποίο βρίσκεται στην Στρατόσφαιρα περίπου εντός 10-11 χιλιομέτρων, εφόσον τα οξείδια του Αζώτου παγιδεύονται στα συγκεκριμένα στρώματα της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν με το Όζον και εν τέλει το εκτοπίζουν καταλύοντας το. [19]



Εικόνα 3–1. Συσχέτιση συγκέντρωσης Οξειδίων του Αζώτου (NO<sub>x</sub>, mass fraction) με Θερμοκρασία και Χρόνο Παραμονής (Residence time) [19]

### 3.4 ΑΚΑΥΣΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ (UHC) & ΚΑΠΝΟΣ

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες μπορεί να αποτελούνται από άκαυστα συστατικά οποιουδήποτε καυσίμου τροφοδοτείται στον θάλαμο καύσης είτε κατώτερης μορφής υδρογονανθράκων που πιθανόν να σχηματίστηκαν από την διάσπαση των προϊόντων του καυσίμου. Η δημιουργία τους οφείλεται σε ατελή καύση, μη ικανοποιητική ανάμιξη του καυσίμου – αέρα και άλλους παράγοντες που εμφανίζονται στα καυσαέρια και τα μόρια μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Έτσι, έχοντας παρόμοιες αιτίες σχηματισμού είναι και εύλογο πως θα έχουν και τις ίδιες συμπεριφορές δηλαδή και αυτά μειώνουν τις συγκεντρώσεις τους με την αύξηση της θερμοκρασίας και πίεσης του θαλάμου καύσης που σημαίνει πως παράγονται λιγότεροι ρύποι της συγκεκριμένης συνομοταξίας σε περιπτώσεις πλήρους λειτουργίας και συνθήκες ονομαστικών φορτίων. Οι UHC είναι τοξικοί όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και αλληλεπιδρώντας με τα οξείδια του Αζώτου (NO<sub>x</sub>) δημιουργούν την αιθαλομίχλη (smog) στην ατμόσφαιρα σε μεγάλες συγκεντρώσεις και καταστροφικές για το περιβάλλον. [20]

Ο καπνός σχηματίζεται με την εμφάνιση των σωματιδίων αιθάλης σε περιοχές όπου το μίγμα είναι αρκετά πλούσιο σε καύσιμο και αυτό οφείλεται, όπως και πολλά άλλα, σε

κακής μορφής ανάμιξη του καυσίμου. Όπως προαναφέραμε ο καπνός αυξάνεται με την αύξηση τη πίεσης εντός του θαλάμου καύσης και παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εντός της πρώτης βαθμίδας όπου εγχύνεται το καύσιμο ενώ στην δεύτερη που έχουμε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου ελαττώνεται σημαντικά η ποσότητα του παραγόμενου καπνού. Αυτός λοιπόν είναι ένας κύριος λόγος που σε αεριοστροβλικές εγκαταστάσεις υψηλής πίεσης παρατηρούνται πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις καπνού. Παρόλο που δεν είναι τόσο βλαβερός για το οικοσύστημα, μιας και απορρίπτεται το περιβάλλον, τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την καταστολή του μπορεί να είναι ιδιαίτερα τοξικά.

### **3.5 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ (CO<sub>2</sub>) ΚΑΙ ΝΕΡΟ (H<sub>2</sub>)**

Όπως συμβαίνει σε συστήματα καύσης οποιουδήποτε υδρογονάνθρακα τα προϊόντα της τέλει καύσης είναι το Διοξείδιο του Άνθρακα CO<sub>2</sub> και το Νερό (H<sub>2</sub>). Το Διοξείδιο αν και θεωρείται ρύπος καθώς παράγεται από τη φυσιολογική λειτουργία της φωτοσύνθεσης όλων των φυτικών οργανισμών, τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί πως σε υψηλές συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα της Γης δεσμεύει την ηλιακή ενέργεια με αποτέλεσμα να αυξάνει προοδευτικά την θερμοκρασία του Πλανήτη και να ανήκει στα καύσιμα του Θερμοκηπίου (Greenhouse gas).



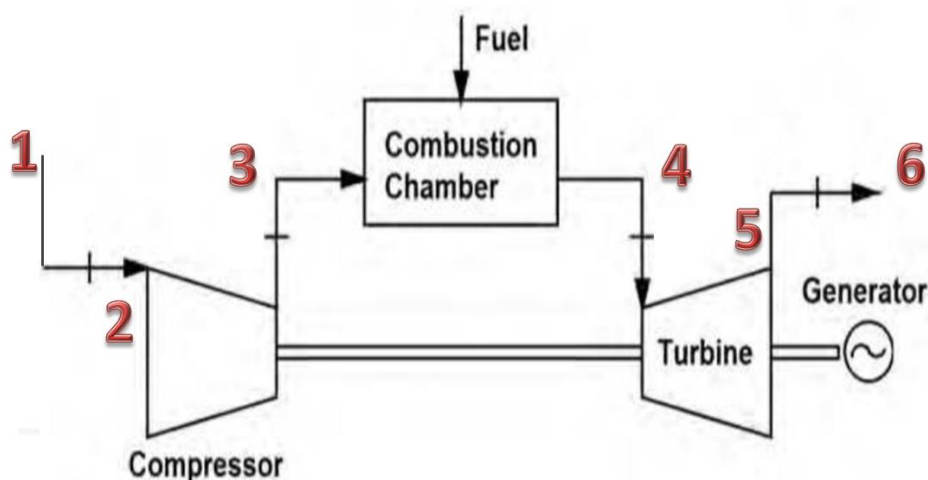
## ΚΕΦ 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ

### ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΣΗΜΕΙΟ

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ

#### 4.1 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ

Ο μικροστρόβιλος απλού άξονα (Εικόνα 4–1) παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου και περιγράφηκε η αρχή λειτουργίας του. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος επίλυσης μιας τέτοιας εγκατάστασης, με σκοπό την εύρεση των επιδόσεών της.



Εικόνα 4–1. Μικροστρόβιλος απλού άξονα. [6]

#### **Δεδομένα για την εγκατάσταση (ανά συνιστώσα):**

Συνθήκες περιβάλλοντος:	θερμοκρασία $T_o$ , πίεση $p_o$
Αγωγός εισόδου:	συντελεστής απωλειών πίεσης $K_{in}$
Συμπιεστής:	παροχή μάζας εισερχόμενου αέρα $\dot{m}_a$ , λόγος πίεσης $\pi_c$ , ισεντροπικός ΒΑ $\eta_{is,C}$
Θάλαμος καύσης:	ΒΑ καύσης $\eta_b$ , συντελεστής απωλειών πίεσης $K_b$
Στρόβιλος:	θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, η οποία είναι και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου $TIT=T_4=T_{max}$ ( $TIT=$ Turbine Inlet Temperature), ισεντροπικός ΒΑ $\eta_{is,T}$
Άξονας συμπιεστή-στροβίλου:	μηχανικός ΒΑ $\eta_m$
Αγωγός εξόδου:	συντελεστής απωλειών πίεσης $K_{ex}$
Ιδιότητες αέρα:	ισεντροπικός εκθέτης $\gamma_a$

Ιδιότητες καυσαερίου:	συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση $c_{pa}$ ισεντροπικός εκθέτης $\gamma_g$
Καύσιμο:	συντελεστής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση $c_{pg}$ κατώτερη θερμογόνος ικανότητα $q_f$

Μεθοδολογία επίλυσης της εγκατάστασης (με δεδομένα τα  $T_{max}$ ,  $\dot{m}_a$ ):

Θερμοκρασία αέρα, θέση (1):  $T_1 = T_o$

Πίεση αέρα, θέση (1):  $p_1 = p_o$

Θερμοκρασία αέρα, θέση (2):  $T_2 = T_1$

Πίεση αέρα, θέση (2):  $p_2 = (1 - K_{in}) p_1$

Θερμοκρασία αέρα, θέση (3):  $T_3 = T_2 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{is,C}} (\pi_C^{\varepsilon_a} - 1) \right\}$ , όπου  $\varepsilon_a = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}$

Πίεση αέρα, θέση (3):  $p_3 = \pi_C p_2$

Λόγος καυσίμου-αέρα στο θάλαμο καύσης (για την επίτευξη της  $T_{max}$ ):  $f = \frac{c_{pg} T_4 - c_{pa} T_3}{\eta_b q_f - c_{pg} T_4}$

Πίεση καυσαερίου, θέση (4):  $p_4 = (1 - K_b) p_3$

Πίεση καυσαερίου, θέση (5):  $p_5 = \frac{P_6}{(1 - K_{ex})}$

Λόγος εκτόνωσης στροβίλου T:  $\pi_T = \frac{P_4}{P_5}$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (5):  $T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{is,T} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\varepsilon_g} \right] \right\}$ , όπου  $\varepsilon_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (6):  $T_6 = T_5$

Ισχύς που απαιτεί ο C:  $\dot{W}_C = \dot{m}_a c_{pa} (T_3 - T_2)$

Ειδικό έργο που απαιτεί ο C:  $w_C = \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_a} = c_{pa} (T_3 - T_2)$

Ισχύς που παράγει ο T:  $\dot{W}_T = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) c_{pg} (T_4 - T_5) = \dot{m}_a (1 + f) c_{pg} (T_4 - T_5)$

Ειδικό έργο που παράγει ο T:  $w_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_a} = (1 + f) c_{pg} (T_4 - T_5)$

Ισχύς αεριοστροβίλου:  $\dot{W} = \frac{1}{\eta_m} \dot{W}_T - \dot{W}_C$

Ειδικό έργο αεριοστροβίλου:  $w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_a} = \frac{1}{\eta_m} \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_a} - \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_a} = \frac{1}{\eta_m} w_T - w_C$

Θερμικός ΒΑ αεριοστροβίλου:  $\eta_\theta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_f} = \frac{\dot{m}_a w}{\dot{m}_f q_f} = \frac{\dot{m}_a w}{f \dot{m}_a q_f} = \frac{w}{f q_f}$

Ειδική κατανάλωση καυσίμου:  $sfc = \frac{1}{\eta_\theta q_f}$

Παροχή μάζας καυσαερίων:  $\dot{m}_g = \dot{m}_a (1 + f)$

Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων:  $T_g = T_6$

Οι παραπάνω σχέσεις συνοψίζονται και καταγράφονται σε πιο συμπαγή μορφή ως συνάρτηση των δεδομένων μεγεθών, στη Μεθοδολογία Επίλυσης 1 (ME-1) που ακολουθεί:

**ME-1 (επίλυση μικροστροβίλου, με δεδομένα τα  $T_{\max}$ ,  $\dot{m}_a$ )**

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}, \quad \varepsilon_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$$

$$\pi_T = (1 - K_{in})(1 - K_b)(1 - K_{ex})\pi_C$$

$$\Delta T_C = \frac{T_o}{\eta_{is,C}} (\pi_C^{\varepsilon_a} - 1)$$

$$\Delta T_T = T_{\max} \eta_{is,T} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\varepsilon_g} \right]$$

$$f = \frac{c_{pg} T_{\max} - c_{pa} (T_o + \Delta T_C)}{\eta_b q_f - c_{pg} T_{\max}}$$

$$w = \frac{1}{\eta_m} (1 + f) c_{pg} \Delta T_T - c_{pa} \Delta T_C$$

$$\eta_\theta = \frac{w}{f q_f}$$

$$sfc = \frac{1}{\eta_\theta q_f}$$

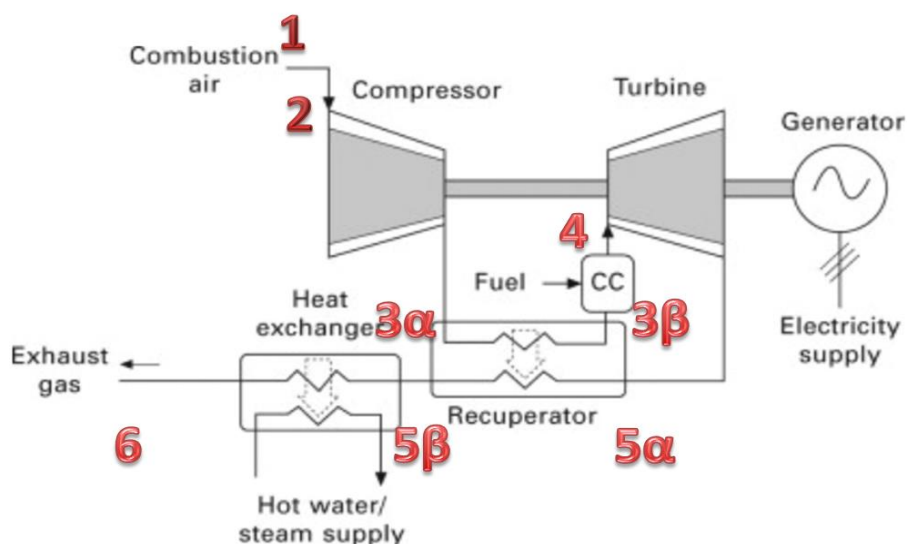
$$\dot{W} = \dot{m}_a w$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a (1 + f)$$

$$T_g = T_{\max} - \Delta T_T$$

## 4.2 ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ ΑΠΛΟΥ ΑΞΟΝΑ ΜΕ ΑΝΑΚΟΜΙΣΤΗ

Ο μικροστρόβιλος απλού άξονα με ανακομιστή (Εικόνα 4–2) επίσης παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος επίλυσης μιας τέτοιας εγκατάστασης, με σκοπό την εύρεση των επιδόσεών της, που περιλαμβάνει κάποια επιπλέον δεδομένα για την εγκατάσταση, καθώς και τροποποιήσεις στη μεθοδολογία επίλυσης ώστε να ληφθεί υπόψη ο ανακομιστής θερμότητας.



Εικόνα 4–2. Μικροστρόβιλος απλής ατράκτου με ανακομιστή [7]

### Δεδομένα για την εγκατάσταση:

Είναι αυτά που ήταν δεδομένα και για την διάταξη μικροστρόβιλου απλού άξονα της προηγούμενης ενότητας, ενώ επιπλέον δίνονται και τα παρακάτω:

Ανακομιστής θερμότητας: βαθμός εκμετάλλευσης  $\eta_E$  (ορίζεται ως  $\eta_E = \frac{T_{3\beta} - T_{3\alpha}}{T_{5\alpha} - T_{3\alpha}}$ )  
 συντελεστές απωλειών πίεσης ψυχρού ρευστού  $K_{E,\psi}$   
 συντελεστές απωλειών πίεσης θερμού ρευστού  $K_{E,\theta}$

Μεθοδολογία επίλυσης της εγκατάστασης (με δεδομένα τα  $T_{max}$ ,  $\dot{m}_a$ ):

Θερμοκρασία αέρα, θέση (1):  $T_1 = T_o$

Πίεση αέρα, θέση (1):  $p_1 = p_o$

Θερμοκρασία αέρα, θέση (2):  $T_2 = T_1$

Πίεση αέρα, θέση (2):  $p_2 = (1 - K_{in}) p_1$

Θερμοκρασία αέρα, θέση (3α):  $T_{3a} = T_2 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{is,C}} (\pi_C^{\varepsilon_a} - 1) \right\}$ , όπου  $\varepsilon_a = \frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}$

Πίεση αέρα, θέση (3α):  $p_{3a} = \pi_C p_2$

Λόγος καυσίμου-αέρα στο θάλαμο καύσης (για την επίτευξη της  $T_{\max}$ ):  $f = \frac{c_{pg}T_4 - c_{pa}T_{3\beta}}{\eta_b q_f - c_{pg}T_4}$

Πίεση αέρα, θέση (3β):  $p_{3\beta} = (1 - K_{E,\Psi}) p_{3\alpha}$

Πίεση αέρα, θέση (4):  $p_4 = (1 - K_b) p_{3\beta}$

Πίεση αέρα, θέση (5β):  $p_{5\beta} = \frac{p_6}{(1 - K_{ex})}$

Πίεση αέρα, θέση (5α):  $p_{5\alpha} = \frac{p_{5\beta}}{(1 - K_{E,\Theta})}$

Λόγος εκτόνωσης στροβίλου T:  $\pi_T = \frac{p_4}{p_{5\beta}}$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (5α):  $T_{5\alpha} = T_4 \left\{ 1 - \eta_{is,T} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\varepsilon_g} \right] \right\}$ , όπου  $\varepsilon_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (3β):  $T_{3\beta} = T_{3\alpha} + \eta_E (T_{5\alpha} - T_{3\alpha})$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (5β): από τον ισολογισμό ενέργειας στον ανακομιστή  
 $\dot{Q}_E = \dot{m}_a c_{pa} (T_{t3\beta} - T_{t3\alpha}) = \dot{m}_g c_{pg} (T_{t5\alpha} - T_{t5\beta}) \Rightarrow$   
 $T_{5\beta} = T_{5\alpha} - \frac{c_{pa} (T_{t3\beta} - T_{t3\alpha})}{c_{pg} (1 + f)}$

Θερμοκρασία καυσαερίου, θέση (6):  $T_6 = T_{5\beta}$

Ισχύς που απαιτεί ο C:  $\dot{W}_C = \dot{m}_a c_{pa} (T_{3\alpha} - T_2)$

Ειδικό έργο που απαιτεί ο C:  $w_C = \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_a} = c_{pa} (T_{3\alpha} - T_2)$

Ισχύς που παράγει ο T:  $\dot{W}_T = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) c_{pg} (T_4 - T_{5\alpha}) = \dot{m}_a (1 + f) c_{pg} (T_4 - T_{5\alpha})$

Ειδικό έργο που παράγει ο T:  $w_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_a} = (1 + f) c_{pg} (T_4 - T_{5\beta})$

Ισχύς αεριοστροβίλου:  $\dot{W} = \frac{1}{\eta_m} \dot{W}_T - \dot{W}_C$

Ειδικό έργο αεριοστροβίλου:  $w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_a} = \frac{1}{\eta_m} \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}_a} - \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}_a} = \frac{1}{\eta_m} w_T - w_C$

Θερμικός ΒΑ αεριοστροβίλου:  $\eta_\theta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_f} = \frac{\dot{m}_a w}{\dot{m}_f q_f} = \frac{\dot{m}_a w}{f \dot{m}_a q_f} = \frac{w}{f q_f}$

Ειδική κατανάλωση καυσίμου:  $sfc = \frac{1}{\eta_{\theta} q_f}$

Παροχή μάζας καυσαερίων:  $\dot{m}_g = \dot{m}_a (1 + f)$

Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων:  $T_g = T_6$

Οι παραπάνω σχέσεις συνοψίζονται και καταγράφονται σε πιο συμπαγή μορφή ως συνάρτηση των δεδομένων μεγεθών, στη Μεθοδολογία Επίλυσης 2 (ME-2) που ακολουθεί:

**ME-2 (επίλυση μικροστροβίλου με ανακομιστή, με δεδομένα τα  $T_{\max}$ ,  $\dot{m}_a$ )**

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{\gamma_{\alpha} - 1}{\gamma_{\alpha}}, \quad \varepsilon_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$$

$$\pi_T = (1 - K_{in})(1 - K_{E,\Psi})(1 - K_b)(1 - K_{E,\Theta})(1 - K_{ex})\pi_C$$

$$\Delta T_C = \frac{T_o}{\eta_{is,C}} (\pi_C^{\varepsilon_a} - 1)$$

$$\Delta T_T = T_{\max} \eta_{is,T} \left[ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\varepsilon_g} \right]$$

$$f = \frac{c_{pg} T_{\max} - c_{pa} \{ (1 - \eta_E)(T_o + \Delta T_C) + \eta_E (T_{\max} - \Delta T_T) \}}{\eta_b q_f - c_{pg} T_{\max}}$$

$$w = \frac{1}{\eta_m} (1 + f) c_{pg} \Delta T_T - c_{pa} \Delta T_C$$

$$\eta_{\theta} = \frac{w}{f q_f}$$

$$sfc = \frac{1}{\eta_{\theta} q_f}$$

$$\dot{W} = \dot{m}_a w$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a (1 + f)$$

$$T_g = T_6 = T_{5\beta} = T_{5\alpha} - \frac{c_{pa} (T_{t3\beta} - T_{t3\alpha})}{c_{pg} (1 + f)}$$

Σημείωση: Η παραπάνω μεθοδολογία ME-2 περιλαμβάνει και την ME-1 της εγκατάστασης απλού άξονα χωρίς ανακομιστή, αρκεί να τεθεί  $\eta_E=0$ , να ταυτιστούν τα σημεία  $3\alpha=3\beta$  και  $5\alpha=5\beta$  και να παραληφθεί η σχεδίαση του ανακομιστή στο σχήμα της μικροστροβλικής διάταξης.

### 4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΥΡΕΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟΥ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Στην προηγούμενη ενότητα περιγράφηκε η διαδικασία επίλυσης εγκατάστασης μικροστρόβιλου απλού άξονα χωρίς ή με ανακομιστή θερμότητας, με γνωστά επιμέρους στοιχεία του εξοπλισμού της, τα οποία ας ονομάσουμε παραμέτρους της εγκατάστασης. Αυτά είναι: ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή και ο αντίστοιχος του στρόβιλου, ο βαθμός απόδοσης θαλάμου καύσης, βαθμός εκμετάλλευσης του ανακομιστή θερμότητας και οι συντελεστές απωλειών πίεσης στις διάφορες συνιστώσες. Δηλαδή οι παράμετροι της εγκατάστασης αποτελούν ένα σύνολο, έστω ΠΕ (Παράμετροι Εγκατάστασης), που αποτελείται από τα ακόλουθα μεγέθη:  $ΠΕ = \{ \pi_C, \eta_{is,C}, \eta_b, \eta_{is,T}, \eta_m, \eta_E, K_{in}, K_b, K_{ex}, K_{E,\psi}, K_{E,\theta} \}$ .

Με γνωστό ΠΕ, δηλαδή γνωστές τις τιμές των μεγεθών του συνόλου ΠΕ και δεδομένα τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου ( $T_{max}$ ) και την παροχή μάζας αέρα που αναρροφά ο συμπιεστής ( $\dot{m}_a$ ), οι επιδόσεις για συγκεκριμένο καύσιμο και ατμοσφαιρικές συνθήκες υπολογίζονται μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας ME-1. Τα υπόλοιπα δεδομένα που χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση είναι η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (διαφορετική τιμή για κάθε καύσιμο), οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και οι ιδιότητες αέρα και καυσαερίου. Οι τελευταίες, δηλαδή ατμοσφαιρικές συνθήκες και ιδιότητες αέρα και καυσαερίου, θεωρήθηκαν σταθερές και ανεξάρτητες του καυσίμου.

Στην παρούσα εργασία απαιτείται η προσομοίωση λειτουργίας μια τέτοιας εγκατάστασης όταν αλλάξει το καύσιμό της. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί γνωστή η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, αλλά μάλλον αποτελεί λειτουργικό χαρακτηριστικό που θα προκύπτει για κάθε καύσιμο κατά την προσομοίωση της λειτουργίας της για την παραγωγή της ονομαστικής της ισχύος. Έτσι, αυτό που θεωρηθεί δεδομένο είναι οι επιδόσεις της μηχανής στο ονομαστικό της σημείο λειτουργίας, τα οποία παρέχονται συνήθως στο φυλλάδιο του κατασκευαστή. Σε αυτό συνήθως αναγράφονται η ισχύς ( $\dot{W}$ ), ο θερμικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_\theta$ ), η παροχή μάζας αέρα στο συμπιεστή ( $\dot{m}_a$ ) ή καυσαερίων ( $\dot{m}_g$ ) και η θερμοκρασία καυσαερίων ( $T_g$ ), ενώ δεν δίνονται στοιχεία για τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του εξοπλισμού (εκτός ίσως του λόγου πίεσης του συμπιεστή), δηλαδή γενικά οι τιμές των μεγεθών του συνόλου ΠΕ είναι άγνωστες.

Στην επόμενη ενότητα, επιλέγεται ένας πραγματικός μικροστρόβιλος του εμπορίου (με ανακομιστή), ως περίπτωση μελέτης της επίδρασης της χρήσης διαφόρων βιοκαυσίμων στις επιδόσεις του, μέσω υπολογιστικών διαδικασιών 'προσομοίωσης λειτουργίας', σαν την ME-2 που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Υπενθυμίζεται ότι η μεθοδολογία ME-2 απαντά ουσιαστικά στο εξής ερώτημα (E1): «Ποιες οι επιδόσεις συγκεκριμένης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης με γνωστό ΠΕ και δεδομένα τη μέγιστη θερμοκρασία και την παροχή μάζας αέρα;». Για να μπορέσει μια τέτοια προσομοίωση να πραγματοποιηθεί στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του εν λόγω μικροστρόβιλου, θα αρκούσε η χρησιμοποίηση της κατάλληλης τιμής θερμογόνου ικανότητας κάθε καυσίμου στην ME-2, αρκεί να ήταν γνωστές οι παράμετροι της εγκατάστασης, δηλαδή οι τιμές των μεταβλητών του συνόλου ΠΕ. Όμως επειδή οι τιμές αυτές όπως είπαμε δεν παρέχονται από τον κατασκευαστή, απαιτείται πρώτα να εκτιμηθούν.

Άρα προκύπτει το εξής Ερώτημα (E2): «Ποιες οι τιμές του άγνωστου συνόλου ΠΕ συγκεκριμένης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης που έχει δεδομένες επιδόσεις;». Ουσιαστικά είναι το αντίστροφο πρόβλημα από αυτό που διατυπώνεται στο ερώτημα E1.

Προκειμένου να απαντήσουμε το Ε2, διατυπώνουμε το εξής ερώτημα (Ε3) (που είναι παραλλαγή του Ε1): «Ποιες οι επιδόσεις συγκεκριμένης αεριοστροβλικής εγκατάστασης με γνωστό ΠΕ και δεδομένα την ισχύ και την παροχή μάζας αέρα;». Το ερώτημα Ε2 διαφέρει από το Ε1 στο ότι προδιαγράφεται η ισχύς της μηχανής αντί της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου. Το Ε2 απαντάται μέσω της μεθοδολογίας ΜΕ-3 που παρουσιάζεται στη συνέχεια και η οποία προκύπτει μέσω κατάλληλης τροποποίησης της διαδικασίας επίλυσης ΜΕ-2. Η ΜΕ-3 περιλαμβάνει επαναληπτική διαδικασία που ως μεταβλητή ελέγχου της σύγκλισης χρησιμοποιεί το λόγο καυσίμου-αέρα.

**ΜΕ-3 (επίλυση μικροστροβίλου με ανακομιστή, με δεδομένα τα  $\tilde{W}$ ,  $\tilde{m}_a$ )**

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\gamma_\alpha - 1}{\gamma_\alpha}, \quad \varepsilon_g = \frac{\gamma_g - 1}{\gamma_g}$$

$$\pi_T = (1 - K_{in})(1 - K_{E,\Psi})(1 - K_b)(1 - K_{E,\Theta})(1 - K_{ex})\pi_C$$

$$\Delta T_C = \frac{T_o}{\eta_{is,C}} (\pi_C^{\varepsilon_a} - 1)$$

$$w_C = c_{pa} \Delta T_C$$

$$\alpha = 1 - \eta_{is,T} \left\{ 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\varepsilon_g} \right\}$$

Υποθέτουμε αρχική τιμή για την θερμοκρασία  $T_{3\beta} = T_{3\alpha} = T_o + \Delta T_C$  (σαν να μην υπάρχει ο ανακομιστής) και για τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου μία υψηλή τιμή, π.χ.  $T_4 = 900\text{K}$  και κάνουμε τους ακόλουθους υπολογισμούς

**Από το σημείο αυτό αρχίζει επαναληπτική διαδικασία**

$$f = \frac{c_{pg} T_4 - c_{pa} T_{3\beta}}{\eta_b q_f - c_{pg} T_4} \quad (*)$$

$$w = \frac{\tilde{W}}{\tilde{m}_a}$$

$$w_T = \eta_m (w_C + w)$$

$$T_{5a} = a T_4$$

$$T_{3\beta} = (1 - \eta_E) T_{3\alpha} + \eta_E T_{5a}$$

$$T'_4 = T_{5a} + \frac{w_T}{(1 + f) c_{pg}}$$

$$f' = \frac{c_{pg} T'_4 - c_{pa} T_{3\beta}}{\eta_b q_f - c_{pg} T'_4}$$

Εξετάζουμε την ισχύ της σχέσης  $\left| \frac{f - f'}{f} \right| 100\% < \varepsilon_f$  (π.χ.  $\varepsilon_f = 0,005\%$ ) (\*\*)



και στη συνέχεια θέτουμε

$$f = f'$$

$$T_4 = T'_4$$

$$T_{3\beta} = T'_{3\beta}$$

Αν η (\*\*) δεν ισχύει, επιστροφή στο βήμα (\*).

Αν η (\*\*) ισχύει, συνεχίζουμε για τον υπολογισμό των επιδόσεων της μηχανής

$$\eta_\theta = \frac{w}{fq_f}$$

$$sfc = \frac{1}{\eta_\theta q_f}$$

$$TIT = T_{\max} = T_4$$

$$T_g = T_6 = T_{5\beta} = T_{5\alpha} - \frac{c_{pa}(T_{t3\beta} - T_{t3a})}{c_{pg}(1+f)}$$

$$\dot{m}_g = \tilde{m}_\alpha (1+f)$$

Εκτός όμως της ισχύος του μικροστροβίλου και της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα, είναι γνωστός από το φυλλάδιο του κατασκευαστή και ο θερμικός βαθμός απόδοσης και η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων. Οι τιμές των δύο πρώτων μεγεθών χρησιμοποιούνται στην ME-3 όπως δίνονται από τον κατασκευαστή και διατηρούνται κατά την επίλυση. Τα δύο τελευταία μεγέθη (θερμικός βαθμός απόδοσης και η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων), προκύπτουν κατά την ME-3 και χρησιμοποιούνται για την απάντηση του E1.

Η απάντηση στο ερώτημα E2 δίνεται με εφαρμογή της παρακάτω διαδικασίας ME-4:

#### ME-4 (εκτίμηση του ΠΕ)

Για κάθε μία από τις μεταβλητές του συνόλου ΠΕ, επιλέγεται κατάλληλο εύρος τιμών.

Από εδώ αρχίζει επαναλαμβανόμενη διαδικασία.

(\*) Δίνεται τυχαία τιμή σε κάθε μεταβλητή του ΠΕ, εντός του αντίστοιχου εύρους.

Εφαρμόζεται η διαδικασία ME-3 (με γνωστά  $\dot{W}$ ,  $\dot{m}_\alpha$ ) και προκύπτουν οι τιμές των  $\eta_\theta, T_g$ .

Υπολογίζεται η απόκλιση από την τιμή του κατασκευαστή για το  $\eta_\theta$ :  $\Delta_{\eta_\theta} = \left| \frac{\eta_\theta - \tilde{\eta}_\theta}{\eta_\theta} \right| 100\%$ .

Υπολογίζεται η απόκλιση από την τιμή του κατασκευαστή για το  $T_g$ :  $\Delta_{T_g} = \left| \frac{T_g - \tilde{T}_g}{T_g} \right| 100\%$ .

Γίνεται συνεκτίμηση και αξιολόγηση των δύο αποκλίσεων.

Αν δεν κρίνονται ικανοποιητικές, επιστροφή στο βήμα (\*).

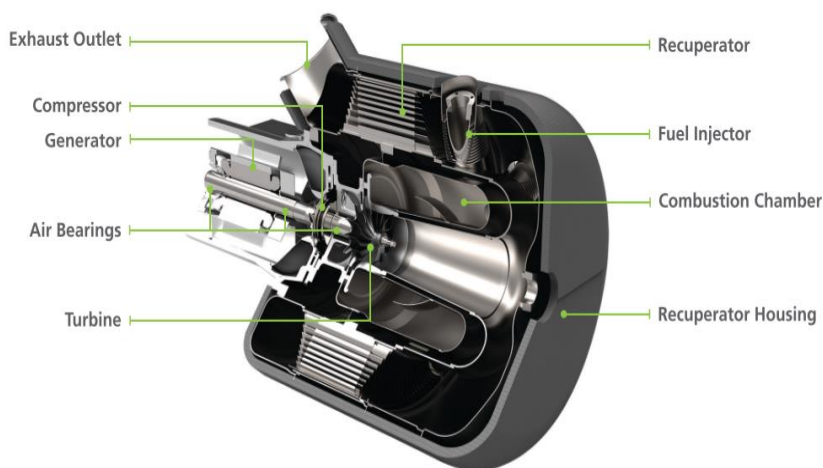
Αν κρίνονται ικανοποιητικές, η διαδικασία σταματά και οι τιμές ΠΕ.

Με πιο αυστηρή μαθηματική διατύπωση, η απάντηση στο ερώτημα E2 θα απαιτούσε την εύρεση των τιμών ΠΕ που ελαχιστοποιούν συγχρόνως τις παραπάνω δύο ποσότητες  $\Delta_{\eta_0}$  και  $\Delta_{T_g}$ . Η εύρεσή της θα απαιτούσε την διατύπωση και επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών. Ένα τέτοιο πρόβλημα θα μπορούσε πολύ ικανοποιητικά να λυθεί π.χ. μέσω ενός γενετικού αλγορίθμου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, απλά προγραμματίστηκε στο πρόγραμμα Excel η διαδικασία ME-3 και εφαρμόστηκε αρκετές φορές αλλάζοντας τιμές για τις μεταβλητές ΠΕ και ελέγχοντας τις παραπάνω δύο αποκλίσεις (όπως περιγράφει η διαδικασία ME-4). Μετά από κάποιο πλήθος δοκιμών, επιλέχθηκαν οι τιμές του ΠΕ που δίνουν το μικρότερο ικανοποιητικό σφάλμα συγχρόνως στις παραπάνω δύο αποκλίσεις.

#### 4.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ως περίπτωση μελέτης επιλέχθηκε ένας πραγματικός μικροστρόβιλος του εμπορίου. Ειδικότερα, πρόκειται για το μοντέλο Capstone C30 [21] ο οποίος είναι απλού άξονα και χρησιμοποιεί ανακομιστή θερμότητας από τα καυσαέρια. Έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 30 KW σχεδιασμένος να λειτουργεί τροφοδοτούμενος είτε με φυσικό αέριο (natural gas) είτε με πετρέλαιο diesel (Εικόνα 4-3).

C30 Engine Components



Εικόνα 4-3. Μικροστρόβιλος model C30, ισχύος 30 KW της Εταιρίας Capstone [21]

Οι επιδόσεις και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εν λόγω μικροστροβίλου καταγράφηκαν με βάση το φυλλάδιο του κατασκευαστή. Επιπλέον, στην εργασία [21] παρουσιάζονται συσχετίσεις της ισχύος του εν λόγω στροβίλου, με βάση τις οποίες μπορεί να εκτιμηθεί η παροχή μάζας και η θερμοκρασία καυσαερίων και ως συνάρτηση της ισχύος της μηχανής, τόσο για την περίπτωση με τον ανακομιστή σε λειτουργία (MGT-rec) όσο και κατά τη λειτουργία χωρίς ανακομιστή (MGT-NOrec). Οι επιδόσεις και χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 4-1).

Πίνακας 4-1 Επιδόσεις-χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας C30

	$\dot{W}$ (kW)	$\eta_{\theta}$	$\dot{m}_g$ (kg/s)	$T_g$ (K)
MGT-rec	29	---	0,305	546,8
MGT-NOrec	29	0,26	0,318	790,2

Με στόχο τον προσδιορισμό των τιμών του συνόλου ΠΕ (παράμετροι λειτουργίας των επιμέρους μηχανημάτων και συνιστωσών), εφαρμόστηκε η διαδικασία ME-4 που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Μετά από κάποιο πλήθος προσπαθειών φάνηκε ότι η καλύτερη λύση που μπορούσε να επιτευχθεί εμφανίζει απόκλιση περίπου 8% (για την περίπτωση με ανακομιστή), τόσο στο θερμικό ΒΑ όσο και στην θερμοκρασία καυσαερίων, ενώ η παροχή μάζας καυσαερίων εκτιμήθηκε με απόκλιση 0,001%. Οι τιμές των παραμέτρων που βρέθηκαν για τις μεταβλητές του συνόλου ΠΕ παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε όλους τους υπολογισμούς, για λειτουργία του μικροστροβίλου με ή χωρίς ανακομιστή και για διάφορα βιοκαύσιμα.

Πίνακας 4-2 Τιμές παραμέτρων εγκατάστασης μικροστροβίλου C30

Παράμετρος	Τιμή
$\pi_c$	3,6
$K_{in}$ (%)	1,5
$K_b$ (%)	2
$K_{ex}$ (%)	1
$K_{E,\psi}$ (%)	0,5
$K_{E,\theta}$ (%)	0,5
$\eta_{is,c}$ (%)	83
$\eta_{is,T}$ (%)	87
$\eta_b$ (%)	98
$\eta_E$ (%)	90
$\eta_m$ (%)	99

## 4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να μελετηθεί και να ποσοτικοποιηθεί μέσω υπολογιστικών προσομοιώσεων η χρήση τεσσάρων υγρών και τεσσάρων αερίων καυσίμων. Σε κάθε μία από τις παραπάνω δύο ομάδες καυσίμων, περιλαμβάνεται ένα συμβατικό καύσιμο και τρία βιοκαύσιμα. Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η θερμογόνος ικανότητα καθενός παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας ME-3, με γνωστές πλέον τιμές για τα μεγέθη του συνόλου ΠΕ (οι τιμές που καταγράφονται στον Πίνακα 4-2 για τον υπό μελέτη μικροστροβίλο C30).

Με χρήση της μεθοδολογίας ME-3, προσομοιώθηκε αρχικά η λειτουργία του μικροστροβίλου, τόσο για την περίπτωση με χρήση ανακομιστή όσο και για αυτήν χωρίς ανακομιστή θερμότητας, για κάθε ένα από τα οκτώ διαφορετικά καύσιμα.

Επίσης προσομοιώθηκε η λειτουργία με χρήση μίγματος καυσίμων και ειδικότερα Diesel-Biodiesel με αναλογία σε βιοκαύσιμο α%, όπου το α λαμβάνει τις τιμές από 0-100%, για την περίπτωση μικροστροβίλου με ανακομιστή θερμότητας.

**Πίνακας 4-3 Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα των 8 καυσίμων [1]**

<b>Καύσιμο</b>	<b>Είδος</b>	<b>Κατάσταση</b>	<b>Θερμογόνος Ικανότητα (kJ/kg)</b>
Ντίζελ	Συμβατικό	Υγρό	44800
Βιοντίζελ	Βιοκαύσιμο	Υγρό	40000
Βιοιθανόλη	Βιοκαύσιμο	Υγρό	25000
Βιομεθανόλη	Βιοκαύσιμο	Υγρό	20000
Φυσικό αέριο	Συμβατικό	Αέριο	42800
Βιοαέριο	Βιοκαύσιμο	Αέριο	22500
Συνθετικό καύσιμο	Βιοκαύσιμο	Αέριο	19000
Υδρογόνο	Βιοκαύσιμο	Αέριο	120000

## **ΚΕΦ 5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Όπως αναφέρθηκε στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, η διαδικασία ME-3 εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που βρέθηκαν για το μικροστρόβιλο C30 (βλ. Πίνακας 4-2), με σκοπό να υπολογιστούν για το ονομαστικό του σημείο λειτουργίας, η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (TIT), ο θερμικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{\theta}$ ), ο λόγος καυσίμου-αέρα (f), η ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc) και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων ( $T_g$ ).

Πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για οκτώ διαφορετικά καύσιμα. Σε κάθε υπολογισμό μεταβαλλόταν κατάλληλα η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου. Οι υπολογισμοί έγιναν αρχικά για την περίπτωση μικροστροβίλου με ανακομιστή (δείκτης rec) και στη συνέχεια επαναλήφθηκαν για την περίπτωση μικροστροβίλου χωρίς ανακομιστή (δείκτης NOrec).

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και πραγματοποιούνται συγκρίσεις των δύο τρόπων λειτουργίας (με και χωρίς ανακομιστή), ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση της χρήσης υγρών και αερίων βιοκαυσίμων στο μικροστρόβιλο με και χωρίς τη χρήση ανακομιστή θερμότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως σε κάθε περίπτωση θεωρήθηκε ότι η μηχανή τροφοδοτείται με την απαιτούμενη παροχή καυσίμου, ώστε να δουλέψει στο ονομαστικό της σημείο λειτουργίας (μέγιστη ισχύς) και να προκύψουν ο θερμικός βαθμός απόδοσης, η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, η θερμοκρασία εξόδου και η παροχή μάζας καυσαερίων. Λόγω του ότι η θερμογόνος ικανότητα των βιοκαυσίμων είναι γενικά μικρότερη αυτής των συμβατικών, αναμένεται η ανάγκη για υψηλότερη παροχή καυσίμου, ώστε να οδηγήσει τη μηχανή να δουλέψει στην ονομαστική (μέγιστη) ισχύ της. Για το σκοπό αυτό, θεωρήθηκε ότι είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με κατάλληλο τρόπο η τροφοδοσία κάθε καυσίμου (π.χ. τροποποιήσεις στο σύστημα τροφοδοσίας και προσαγωγής καυσίμου), ότι η καύση είναι ευσταθής, το ίδιο εύκολη και αποδοτική με την περίπτωση του συμβατικού καυσίμου.

Εναλλακτικό σενάριο θα ήταν, να θεωρηθεί ότι η μηχανή τροφοδοτείται με βιοκαύσιμο ίδιας παροχής με το συμβατικό από το υπάρχον σύστημα τροφοδοσίας και να υπολογιστούν οι επιδόσεις της. Επειδή η θερμογόνος ικανότητα των βιοκαυσίμων είναι γενικά μικρότερη αυτής των συμβατικών, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε απλά σε λειτουργία της μηχανής σε μερικά φορτία. Τέτοιο σενάριο δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να εξεταστεί, καθώς κρίνεται ότι δεν θα παρήγαγε χρήσιμη πληροφορία.

Στο παρόν κεφάλαιο, εκτός της μελέτης επίπτωσης της χρήσης βιοκαυσίμου στις επιδόσεις μικροστροβίλου με και χωρίς τη χρήση ανακομιστή, πραγματοποιείται σύγκρισή και με σχετικά αποτελέσματα από την εργασία [1] όπου περιγράφεται αντίστοιχη δουλειά σε βιομηχανικό αεριοστρόβιλο υψηλής ισχύος χωρίς ανακομιστή (heavy duty gas turbine), ισχύος 25MW.

Τέλος, αξιολογείται η επίδραση στις επιδόσεις της μηχανής, του ποσοστού βιοκαυσίμου, στην περίπτωση τροφοδοσίας της με μίγμα Diesel–Biodiesel.

Όλες οι συγκρίσεις πραγματοποιούνται στη βάση των μεγεθών που υπολογίστηκαν σε κάθε προσομοίωση και αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αρχικά σε πίνακες και στη συνέχεια σε μορφή διαγραμμάτων.

Ο Πίνακας 5-1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για διάφορα καύσιμα στην περίπτωση μικροστροβίλου με ανακομιστή. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση μικροστροβίλου χωρίς ανακομιστή, ενώ ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει αντίστοιχα αποτελέσματα στην περίπτωση βιομηχανικού αεριοστροβίλου υψηλής ισχύος [1]

Πίνακας 5-1 Αποτελέσματα μικροστροβίλου με ανακομιστή

Καύσιμο	TIT=T <sub>max</sub> (K)	f	sfc (g/kWh)	T <sub>ex</sub> =T <sub>g</sub> (K)	η <sub>θ</sub>
Συνθετικό καύσιμο	931,4	0,021450	0,787692	505,2	0,240543
Βιομεθανόλη	932,4	0,020341	0,746978	505,1	0,240971
Βιοαέριο	934,6	0,018013	0,661489	505,0	0,241878
Βιοιθανόλη	936,2	0,016163	0,593552	504,9	0,242607
Βιοντίζελ	941,9	0,010000	0,367216	504,6	0,245087
Φυσικό αέριο	942,6	0,009335	0,342812	504,5	0,245359
Ντίζελ	942,9	0,008912	0,327276	504,5	0,245533
Υδρογόνο	948,2	0,003296	0,121027	504,1	0,247878

Πίνακας 5-2 Αποτελέσματα μικροστροβίλου χωρίς ανακομιστή.

Καύσιμο	TIT=T <sub>max</sub> (K)	f	sfc (g/kWh)	T <sub>ex</sub> =T <sub>g</sub> (K)	η <sub>θ</sub>
Συνθετικό καύσιμο	919,4	0,034932	1,282816	709,6	0,147701
Βιομεθανόλη	920,9	0,033184	1,218626	710,8	0,147707
Βιοαέριο	924,2	0,029494	1,083126	713,4	0,147721
Βιοιθανόλη	926,8	0,026543	0,974741	715,4	0,147732
Βιοντίζελ	935,9	0,016585	0,609048	722,4	0,147772
Φυσικό αέριο	936,9	0,015499	0,569186	723,1	0,147776
Ντίζελ	937,5	0,014807	0,543765	723,6	0,147779
Υδρογόνο	946,1	0,005526	0,202947	730,3	0,147822

Πίνακας 5-3 Αποτελέσματα βιομηχανικού αεριοστροβίλου υψηλής ισχύος [12].

Καύσιμο	TIT=T <sub>max</sub> (K)	f	sfc (g/kWh)	T <sub>ex</sub> =T <sub>g</sub> (K)	η <sub>θ</sub>
Συνθετικό καύσιμο	1496,8	0,0582	0,0059	819,9	0,3212
Βιομεθανόλη	1499,2	0,0552	0,0056	821,1	0,3219
Βιοαέριο	1504,1	0,0488	0,0049	823,8	0,3234
Βιοιθανόλη	1508,1	0,0438	0,0044	826,0	0,3246
Βιοντίζελ	1521,5	0,0270	0,0027	833,3	0,3287
Φυσικό αέριο	1522,9	0,0252	0,0026	834,1	0,3291
Ντίζελ	1523,9	0,0241	0,0024	834,6	0,3294
Υδρογόνο	1536,5	0,0089	0,0009	841,5	0,3332

## 5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

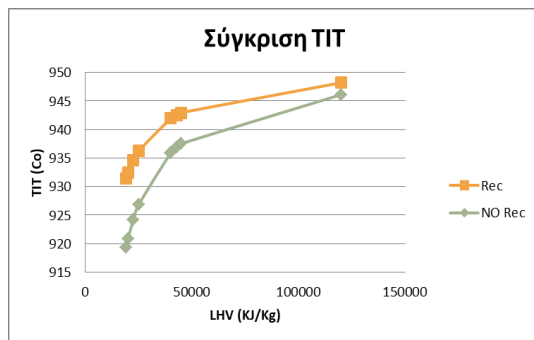
Στα Σχήμα 5–1, Σχήμα 5–2 και Σχήμα 5–3 παρουσιάζεται η επίδραση που έχει η χρήση διαφόρων βιοκαυσίμων στη μέγιστη θερμοκρασία (TIT) του κύκλου και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, για τις περιπτώσεις με και χωρίς τη χρήση ανακομιστή θερμότητας. Επειδή διαφορετικό καύσιμο στις προσομοιώσεις που έγιναν αντιστοιχεί πρακτικά σε διαφορετική θερμογόνο ικανότητα, τα διαγράμματα παρουσιάζονται στη μορφή TIT-LHV και sfc-LHV.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 5–1(α) φαίνεται ότι η μείωση της θερμογόνου ικανότητας (LHV) οδηγεί στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της μηχανής (TIT), τόσο στην περίπτωση λειτουργίας της με ανακομιστή θερμότητας (Rec), όσο και χωρίς αυτόν (NO Rec). Ο τρόπος μεταβολής στις δύο περιπτώσεις είναι αντίστοιχος. Οι τιμές TIT είναι λίγο υψηλότερες στην περίπτωση με ανακομιστή (περίπου 5-10 K).

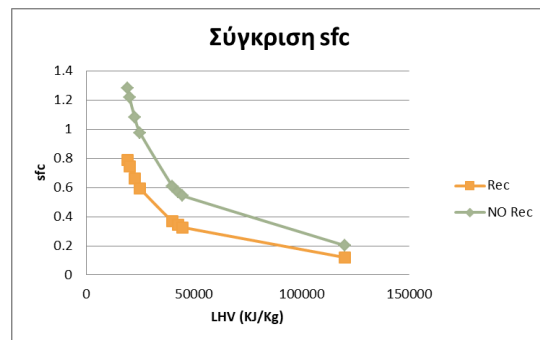
Στο Σχήμα 5–1(β) φαίνεται ότι με τη μείωση της θερμογόνου ικανότητας (LHV) αυξάνεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc), τόσο με όσο και χωρίς ανακομιστή θερμότητας. Και πάλι ο τρόπος μεταβολής στις δύο περιπτώσεις είναι αντίστοιχος. Οι τιμές του sfc σε κάθε περίπτωση είναι υψηλότερες στην περίπτωση χωρίς ανακομιστή.

Αν κοιτάξει κανείς στους Πίνακες 5-1 και Πίνακας 5-2 , θα δει ότι στην περίπτωση χωρίς ανακομιστή ο λόγος καυσίμου-αέρα είναι υψηλότερος, δηλαδή έχουμε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Όμως στην περίπτωση με ανακομιστή, η ειδική κατανάλωση καυσίμου είναι χαμηλότερη, γιατί η διάταξη αυτή εμφανίζει υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με την απλή (Πίνακας 5-1 και Πίνακας 5-2), αφού  $sfc=1/(\eta_{\theta}LHV)$ . Πάντως, σε κάθε περίπτωση, η μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι να μειώνεται με τη μείωση της θερμογόνου ικανότητας και συνακόλουθα να αυξάνει η ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Στο Σχήμα 5–2(α) παρουσιάζεται η αντίστοιχη μεταβολή του λόγου καυσίμου-αέρα, ενώ στο Σχήμα 5–2(β) αυτή της παροχής μάζας καυσαερίου. Η παροχή καυσαερίου, για ίδια παροχή αέρα, είναι υψηλότερη όπου είναι μεγαλύτερος και ο λόγος  $f$ , αφού  $m_g=m_a(1+f)$ .

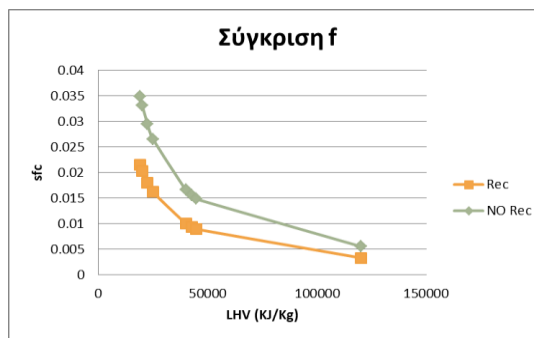


(α)

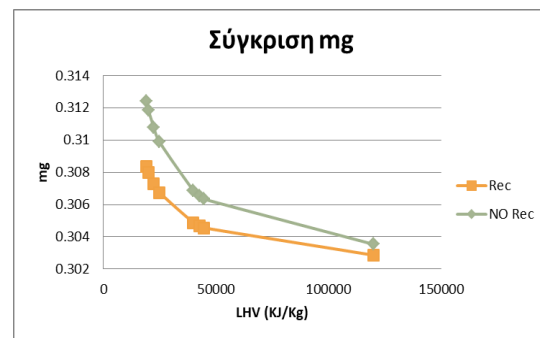


(β)

Σχήμα 5–1. Σύγκριση της μεταβολής (α) της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου TIT και (β) της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου sfc ως προς την τιμή της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας LHV του καυσίμου.



(α)

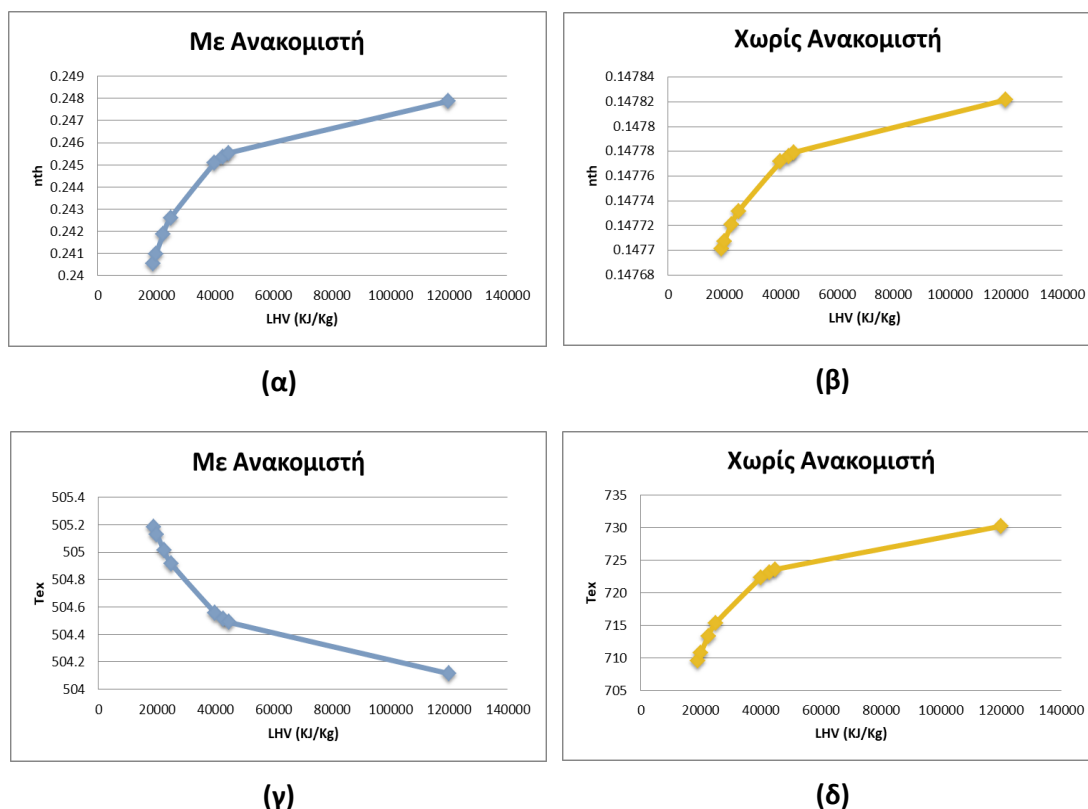


(β)

Σχήμα 5–2. Σύγκριση της μεταβολής (α) του λόγου καυσίμου-αέρα  $f$  και (β) της παροχής μάζας καυσαερίου  $m_g$  ως προς την τιμή της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας LHV του καυσίμου.

Τέλος, στο Σχήμα 5–3 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές του θερμικού βαθμού απόδοσης και της θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίου για τα διάφορα καύσιμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου, τόσο υψηλότερη η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων. Επιπλέον, η θερμοκρασία εξόδου είναι πάντοτε μεγαλύτερη στην περίπτωση χωρίς ανακομιστή, κάτι που είναι λογικό, διότι όταν υπάρχει ανακομιστής, εκμεταλλευόμαστε μέρος της θερμότητας του καυσαερίου και μειώνεται η θερμοκρασία του, ενώ συγχρόνως αυξάνει ο θερμικός βαθμός απόδοσης επειδή ουσιαστικά μειώνεται η απώλεια θερμότητας καυσαερίων. Με βάση τα διαγράμματα του  $\eta_\theta$ , η μεταβολή του θερμικού βαθμού απόδοσης της μηχανής είναι πολύ μικρή αλλάζοντας καύσιμο. Δηλαδή με βάση τον ορισμό του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι  $\eta_\theta = W / (f m_a LHV)$ , οπότε αλλάζοντας καύσιμο, προκειμένου να παραχθεί η ίδια ισχύς  $W$ , απαιτείται περισσότερο καύσιμο (μεγαλύτερο  $f$ ) με χαμηλότερη θερμογόνου ικανότητας (LHV). Δηλαδή το γεγονός ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης μένει περίπου σταθερός για την ίδια μηχανή σημαίνει ότι το γινόμενο  $f LHV$  είναι περίπου σταθερό για τα διάφορα καύσιμα.





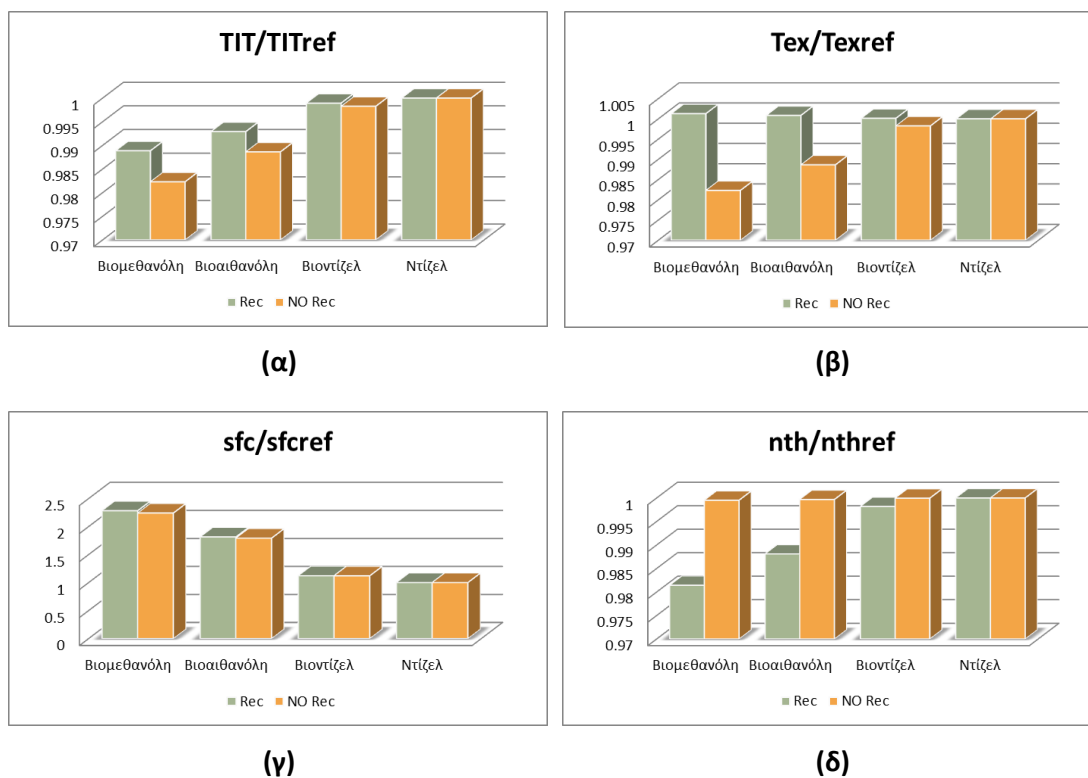
Σχήμα 5–3. Σύγκριση καμπύλης θερμικού βαθμού απόδοσης-LHV, (α) με ανακομιστή και (β) χωρίς, καθώς και της θερμοκρασίας καυσαερίου-LHV (α) με ανακομιστή και (δ) χωρίς ανακομιστή.

## 5.2 ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΥΓΡΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα κάθε υγρού βιοκαυσίμου με την τιμή αναφοράς, η οποία για την εν λόγω μηχανή είναι η τιμή που επιτυγχάνει η μηχανή καίγοντας συμβατικό υγρό καύσιμο, δηλαδή Diesel.

Τα υγρά βιοκαύσιμα στην παρούσα εργασία είναι τα Βιομεθανόλη, Βιοαιθανόλη και Βιοντίζελ, ενώ το συμβατικό καύσιμο είναι το Ντίζελ. Στο Σχήμα 5–4 δίνονται σε αδιάστατη μορφή οι τιμές των  $TIT$ ,  $T_{ex}$ ,  $sfc$  και  $\eta_b$  για τα υγρά καύσιμα. Δηλαδή, για κάθε βιοκαύσιμο, η τιμή π.χ.  $TIT$  έχει διαιρεθεί με την αντίστοιχη τιμή που επιτυγχάνεται για το συμβατικό καύσιμο ( $TIT_{ref}$ ), τόσο για τις περιπτώσεις λειτουργίας με ανακομιστή όσο και χωρίς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα για λόγους σύγκρισης.

Στο Σχήμα 5–4(α), όπου παρουσιάζεται η αδιάστατη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, φαίνεται ότι η μείωσή της για βιοκαύσιμα μικρότερης θερμογόνου ικανότητας από το συμβατικό Diesel είναι πιο έντονη στην περίπτωση λειτουργίας χωρίς ανακομιστή θερμότητας. Στο Σχήμα 5–4(β) φαίνεται ότι η θερμοκρασία εξόδου καυσαερίου μειώνεται στην περίπτωση χωρίς ανακομιστή, ενώ στην περίπτωση λειτουργίας σε μέγιστη ισχύ με χρήση ανακομιστή είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το είδος του καυσίμου.



Σχήμα 5-4. Σύγκριση αδιάστατων μεγεθών υγρών βιοκαυσίμων ως προς τιμές αναφοράς συμβατικού καυσίμου, για την περίπτωση του ανακομιστή και χωρίς ανακομιστή στον μικροστρόβιλο.

Ο Πίνακας 5-4 δίνει ποσοτικά την ποσοστιαία απόκλιση κάθε μεγέθους από την αντίστοιχη τιμή που επιτυγχάνεται με το συμβατικό καύσιμο (Diesel). Για παράδειγμα, η χρήση βιομεθανόλης επιφέρει αύξηση 1,77% στη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, ενώ η χρήση βιοντίζελ επιφέρει μείωση 12,01% στην ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Πίνακας 5-4 Ποσοστιαία απόκλιση (%) υγρών βιοκαυσίμων

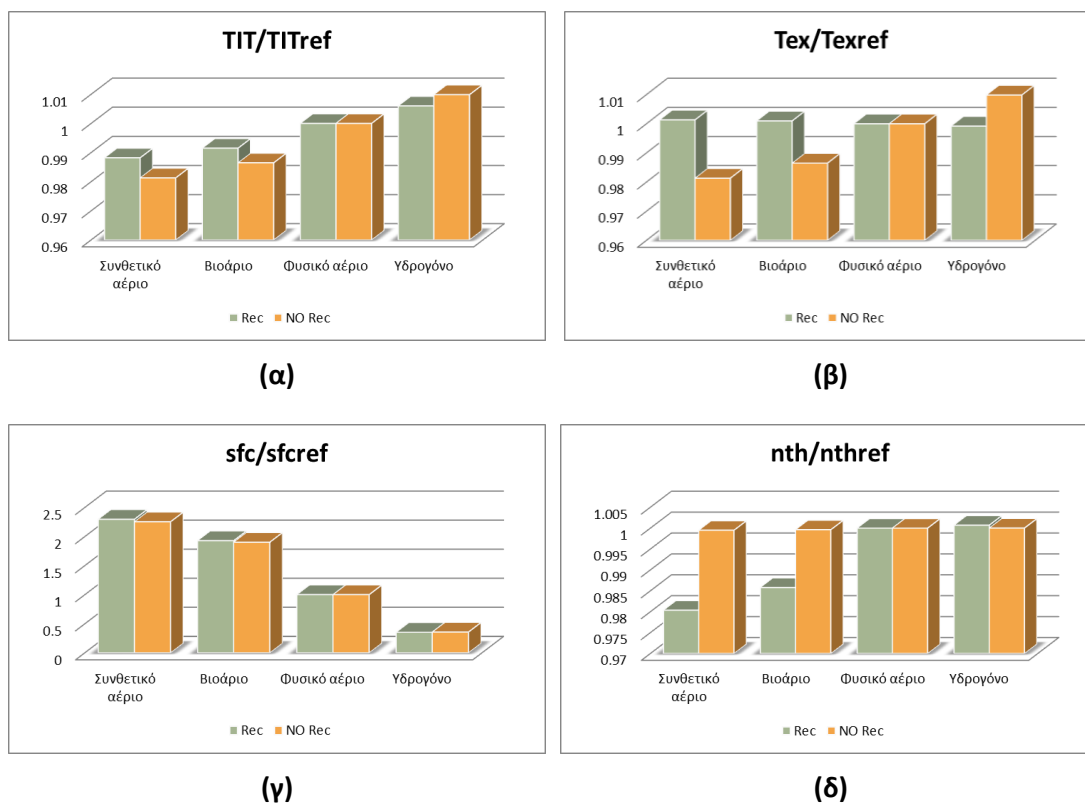
Υγρά καύσιμα	TIT	Tex	sfc	$\eta_{\theta}$
Βιομεθανόλη	1,77	1,77	-124,11	0,049
Βιοαιθανόλη	1,14	1,14	-79,26	0,032
Βιοντίζελ	0,17	0,17	-12,01	0,005
Ντίζελ	0	0	0	0

### 5.3 ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΑΠΟ ΑΕΡΙΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα αποτελέσματα κάθε αερίου βιοκαυσίμου με την τιμή αναφοράς, η οποία για την εν λόγω μηχανή είναι η τιμή που επιτυγχάνει η μηχανή καίγοντας συμβατικό αέριο καύσιμο, δηλαδή φυσικό αέριο.

Τα αέρια βιοκαύσιμα στην παρούσα εργασία είναι τα Συνθετικό αέριο, Βιοαέριο και Υδρογόνο, ενώ το συμβατικό καύσιμο είναι το Φυσικό αέριο. Στο Σχήμα 5-5, παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, η θερμοκρασία

εξόδου καυσαερίου, η ειδική κατανάλωση καυσίμου και ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Η συμπεριφορά είναι ακριβώς ίδια όπως και στα υγρά καύσιμα.



Σχήμα 5-5. Σύγκριση αέριων βιοκαυσίμων σχετικά με τα αδιάστατα μεγέθη για την περίπτωση του ανακομιστή και χωρίς ανακομιστή στον μικροστρόβιλο

Ο Πίνακας 5-5 δίνει ποσοτικά την ποσοστιαία απόκλιση κάθε μεγέθους από την αντίστοιχη τιμή που επιτυγχάνεται με το συμβατικό καύσιμο (φυσικό αέριο).

Πίνακας 5-5 Ποσοστιαία απόκλιση (%) αέριων βιοκαυσίμων

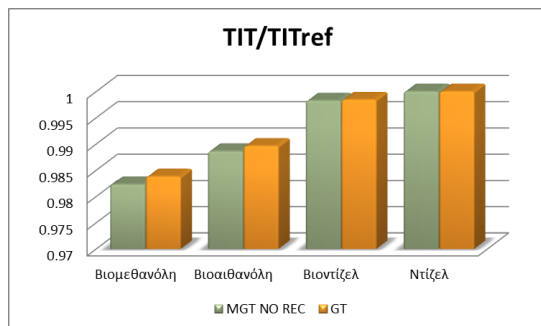
Αέρια καύσιμα	TIT	Tex	sfc	nth
Συνθετικό καύσιμο	1,87	1,87	-125,38	0,051
Βιοαέριο	1,35	1,35	-90,30	0,038
Φυσικό αέριο	0	0	0	0
Υδρογόνο	-0,99	-0,99	64,34	-0,031

## 5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟ (MGT) ΚΑΙ ΣΕ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΙΟ ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (GT)

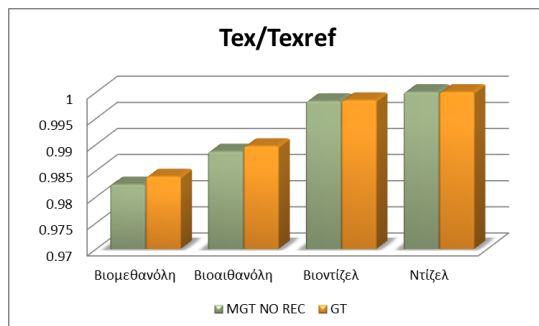
### 5.4.1 ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Στην ενότητα αυτή δίνονται διαγράμματα αντίστοιχα με αυτά της προηγούμενης ενότητας που αποσκοπούν στη σύγκριση της επίδρασης που έχει σε αεριοστρόβιλο η χρήση υγρού βιοκαυσίμου σε αντικατάσταση του συμβατικού. Η σύγκριση αφορά μικροστρόβιλο χωρίς ανακομιστή (MGT NO REC) και βιομηχανικό αεριοστρόβιλο υψηλής ισχύος (GT).

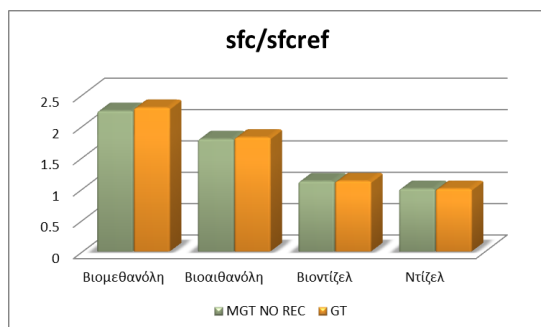
Τα διαγράμματα δείχνουν αντίστοιχη ποσόστωση του κάθε μεγέθους σε σχέση με το συμβατικό καύσιμο, εκτός του θερμικού βαθμού απόδοσης, όπου ο βιομηχανικός αεριοστρόβιλος υπόκειται σε σημαντικότερη μείωση του σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό για τον μικροστρόβιλο.



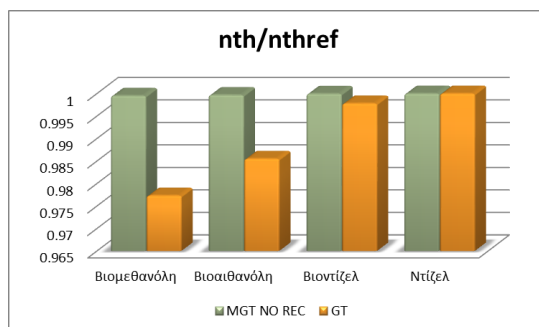
(α)



(β)



(γ)



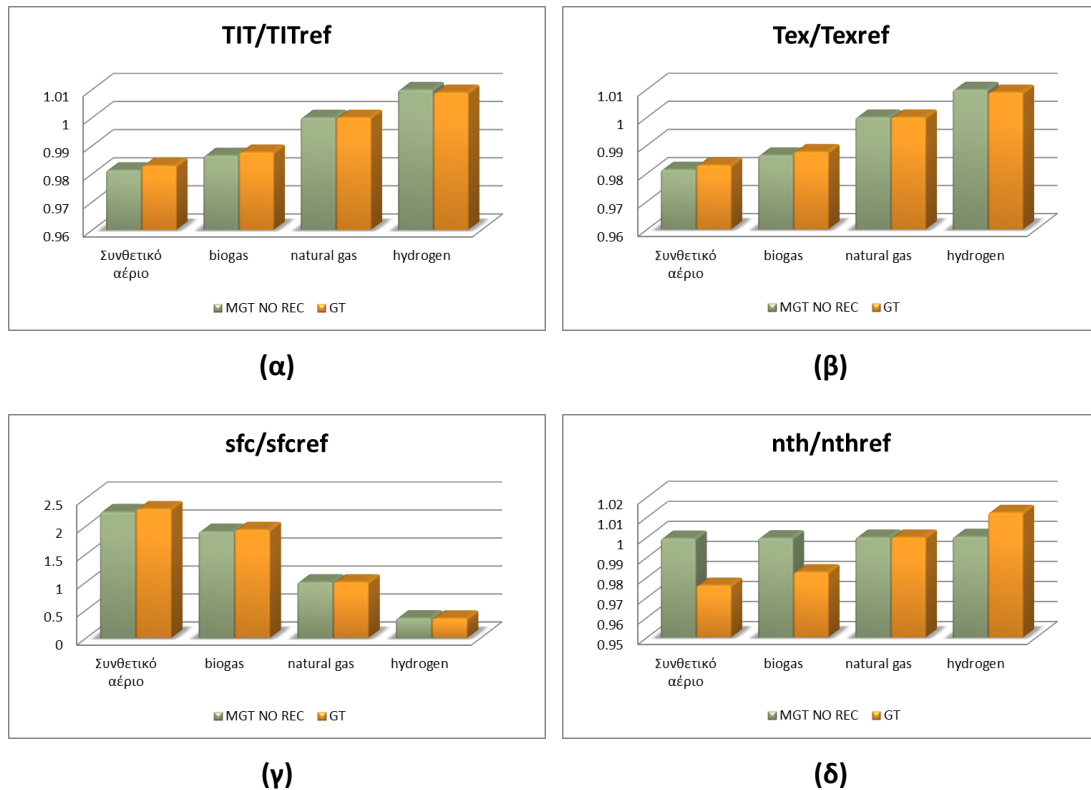
(δ)

Σχήμα 5–6. Σύγκριση υγρών βιοκαυσίμων σχετικά με τα αδιάστατα μεγέθη τους για την περίπτωση MGT NO Rec και GT

## 5.4.2 ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Στην ενότητα αυτή δίνονται διαγράμματα αντίστοιχα με αυτά της προηγούμενης ενότητας που αποσκοπούν στη σύγκριση της επίδρασης που έχει σε αεριοστρόβιλο η χρήση αερίου βιοκαυσίμου σε αντικατάσταση του συμβατικού. Η σύγκριση αφορά μικροστρόβιλο χωρίς ανακομιστή (MGTNO REC) και βιομηχανικό αεριοστρόβιλο υψηλής ισχύος (GT).

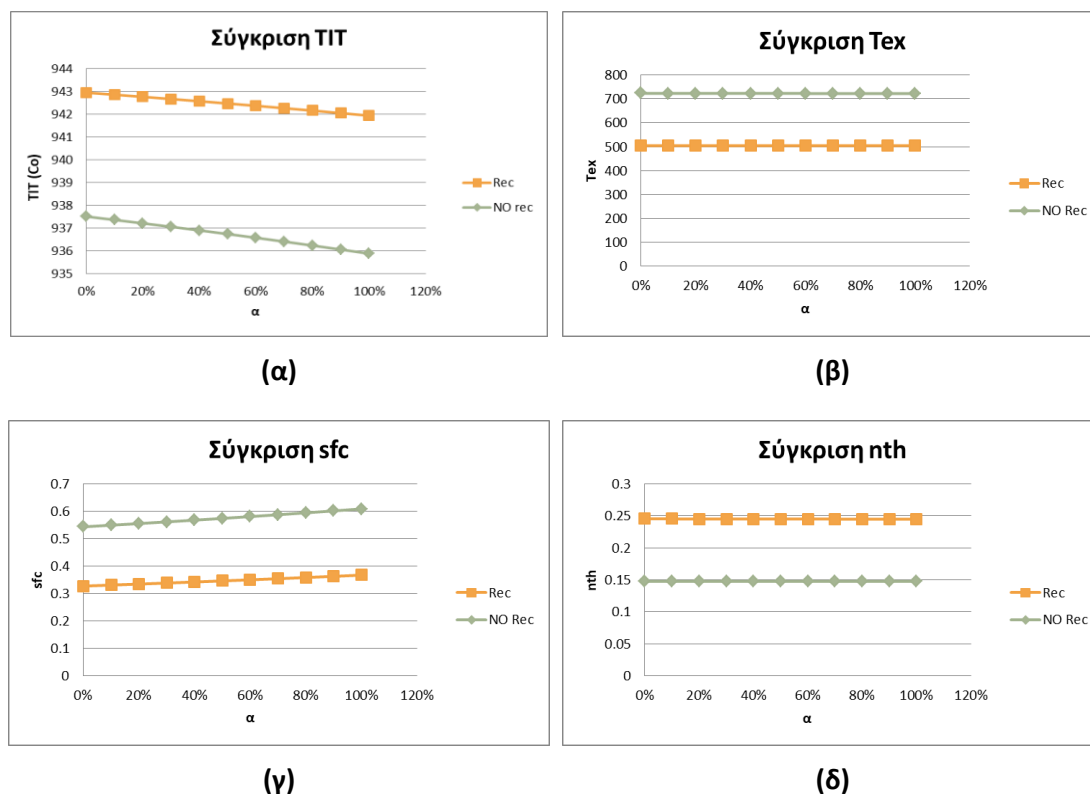
Τα διαγράμματα δείχνουν ότι και τα αντίστοιχα παραπάνω για υγρά καύσιμα, δηλαδή πιο σοβαρή επίδραση δέχεται ο βιομηχανικός αεριοστρόβιλος στο βαθμό απόδοσής του (μείωση).



Σχήμα 5–7. Σύγκριση αέριων βιοκαυσίμων σχετικά με τα αδιάστατα μεγέθη τους για την περίπτωση MGT NO Rec και GT

## 5.5 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΑΜΙΞΗΣ DIESEL-BIODIESEL

Στην ενότητα αυτή, παρατηρούνται οι αλλαγές που προκαλεί το ποσοστό της ανάμιξης ενός συμβατικού καυσίμου (Diesel) και ενός βιοκαυσίμου (Biodiesel) στα υπό εξέταση μεγέθη του μικροστροβίλου. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται ως προς το ποσοστό του βιοκαυσίμου στην ποσότητα του συμβατικού καυσίμου με το σύμβολο  $\alpha$ , άρα όπου βλέπουμε 0% σημαίνει πως δεν υπάρχει καθόλου ποσότητα Biodiesel μέσα στο Diesel ενώ όπου βλέπουμε 100% σημαίνει πως το καύσιμο μας είναι όλο Biodiesel και καθόλου Diesel.



Σχήμα 5–8. Σύγκριση TIT (α), Tex (β), sfc (γ) και nth (δ) σχέση με το ποσοστό του biodiesel στο diesel  $\alpha$

Στο Σχήμα 5–8 βλέπουμε πως για την περίπτωση που δεν υπάρχει ανακομιστής παρατηρείται μείωση στην θερμική απόδοση (nth) και στην μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (TIT) λόγω της μη αναθέρμανσης του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, ενώ αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (sfc) και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων (Tex).

Όσον αφορά την σταδιακή αύξηση της ποσότητας βιοντίζελ στο μίγμα του ντίζελ παρατηρούμε πως έχει αρνητική επίδραση στην θερμική απόδοση (nth) και στην μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου (TIT) λόγω της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας του βιοντίζελ που δε μπορεί να επιτύχει υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου άρα συνεπώς θα μειώσει και την θερμική απόδοση (nth) και θα αυξήσει την ειδική κατανάλωση καυσίμου με σκοπό να πλησιάσει την ονομαστική ηλεκτρική απόδοση για το ίδιο φορτίο.

## **5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της χρήσης βιοκαυσίμων στη λειτουργία μικροστροβίλου με και χωρίς ανακομιστή μέσω απλού υπολογιστικού προγράμματος και υποθετικών υπολογισμών, καθώς επίσης θεωρήθηκε πως οι τροποποιήσεις που επιφέρει η αλλαγή καυσίμου δεν επηρεάζουν τη συγκεκριμένη μέθοδο που ακολουθήθηκε. Παρατηρήθηκε πως με τη μείωση της θερμογόνου ικανότητας από τη χρήση των βιοκαυσίμων είχαμε σταδιακή μείωση στις επιδόσεις του μικροστροβίλου με και χωρίς ανακομιστή, όμως στην περίπτωση του ανακομιστή επιτυγχάνονταν υψηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες του κύκλου και κατά συνέπεια μεγαλύτερες αποδόσεις αλλά και χαμηλότερες καταναλώσεις καυσίμου συγκριτικά με την περίπτωση που δεν υπήρχε ανακομιστής. Το Σχήμα 5-6(δ) και Σχήμα 5-7(δ) συγκρίνει τον μικροστρόβιλο χωρίς ανακομιστή και τον βιομηχανικό στρόβιλο μεγάλης ισχύος όπου παρατηρείται πως ο βιομηχανικός αεριοστρόβιλος παρουσιάζει μεγαλύτερη εξάρτηση από την αλλαγή του καυσίμου λειτουργίας του σε βιοκαύσιμο και συνεπώς μεγαλύτερη μείωση στο ποσοστό του θερμικού βαθμού απόδοσης του. Στα Σχήμα 5-6(γ) και Σχήμα 5-7(γ) φαίνεται πως υπάρχει μεγαλύτερη επίδραση στο ποσοστό της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (αύξηση) στον βιομηχανικό στρόβιλο από ότι στον μικροστρόβιλο χωρίς ανακομιστή. Θα μπορούσε, λοιπόν, κανείς να πει πως ο μικροστρόβιλος ανταποκρίνεται καλύτερα στην αλλαγή του καυσίμου του σε βιοκαύσιμο, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας κάτω από θεωρητικές συνθήκες.

Ως πιθανή μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να προταθεί η συνέχιση της παρούσας ερευνητικής εργασίας στην περίπτωση λειτουργίας του μικροστροβίλου σε μερικά φορτία (off-design). Προς την κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να τροποποιηθεί η υπολογιστική διαδικασία, ώστε να λάβει υπόψη της μοντέλα της βιβλιογραφίας που αντιμετωπίζουν τη λειτουργία αεριοστροβίλων σε μερικά φορτία.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] D.G. KOUBOGIANNIS and M. TOUSMANOV, “The effect of using biofuels on gas turbine performance”, 3rd Energy Tech Forum, Eugenides Foundation, Athens, Greece, October 16, 2018.
- [2] Δρ. Δ. Μανωλάκος, “Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική, Κύκλος Brayton”  
[https://mediasrv.aua.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L5\\_Brayton\\_Cycle%20%2831%20slides%29.pdf](https://mediasrv.aua.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L5_Brayton_Cycle%20%2831%20slides%29.pdf)
- [3] Απόστολος Λ. Πολυζάκης, “Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας – Προώθηση Θεωρία”, **σελ. 1**
- [4] TechNavio Blog: Top 10 Gas Turbine Manufacturers in the World 2018  
<https://blog.technavio.com/blog/top-10-gas-turbine-manufacturers>
- [5] Tine Seljak, Klemen Pavalec, Marco Buffi, “Challenges and solutions for utilization of Bio liquids in micro turbines”, GTP-18-1528.
- [6] Marco Antônio Rosa dos Nascimento, Eraldo Cruz dos Santos, “Biofuel and Gas Turbine Engines”, Federal University of Itajubá – UNIFEI Brazil.
- [7] R. Boukhanouf, “Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems”, 2011 (Εικόνα μικροστροβίλου με ανακομιστή).
- [8] microturbine@ansaldoenergia.com, “MICRO GAS TURBINES AET100”.  
<https://www.ansaldoenergia.com/business-lines/new-units/microturbines>
- [9] J.D.GILCHRIST, A.R.C.S.T., F.I.M., “Fuels, Furnaces and Refractories” 14 - Thermal Efficiency, International Series on Materials Science and Technology 1977, Pages 172-182.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080204307500190>
- [10] Alberto Traverso, F.Massardo, “Optimal design of compact recuperators for microturbine application”, Applied Thermal Engineering Volume 25, Issues 14–15, October 2005, Pages 2054-2071.
- [11] Marco A.R. Nascimento, Electo S.Lora, Paulo S.P. Corrêa, Rubenildo V.Andrade, Manuel A.Rendon, Osvaldo J.Venturini, Guido A.S.Ramirez, “Biodiesel fuel in diesel micro-turbine engines: Modelling and experimental evaluation”, Energy 33 (2008) 233-240.
- [12] A. Hoxie, M. Anderson, “Evaluating high volume blends of vegetable oil in micro-gas turbine engines”, Renewable Energy, Volume 101, February 2017, Pages 886-893
- [13] An article about the Kyoto Protocol:  
[https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol)
- [14] K.K. Gupta , A. Rehman, R.M. Sarviya, “Bio-fuels for the gas turbine: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2010), 2946-2955.



- [15] Ibrahim I.Enagi, K.A. Al-attab, Z.A.Zainal, "Liquid biofuels utilization for gas turbines: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 90, July 2018, Pages 43-55.
- [16] Ιωαννίδης Χρήστος, "Η Βιοαιθανόλη στην Ελλάδα. Παρόν και προοπτικές" Πτυχιακή εργασία, Καβάλα, Μάιος 2013.
- [17] Prasad Kararaju, Jukka Rintala, "THE BIOGAS HANDBOOK", 2013, 17.3.8 Generation of electricity in a micro gas turbine
- [18] ETSAP Energy Technology System Analysis Programme, "Biogas and Bio-syngas production", Technology Brief P11.

[https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P11\\_BiogasProd\\_ML\\_Dec2013\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P11_BiogasProd_ML_Dec2013_GSOK.pdf)

- [19] Απόστολος Λ. Πολυζάκης, "Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας – Προώθηση Θεωρία", σελ. 829.
- [20] Απόστολος Λ. Πολυζάκης, "Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Παραγωγή Ενέργειας – Προώθηση Θεωρία", σελ. 831.
- [21] W. Racthan and L. Malinowski, "An approximate expression for part-load performance of a microturbine combined heat and power system heat recovery unit", Energy, 51 (2013) 146-153.