



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής**  
**Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

Διπλωματική Εργασία του φοιτητή του Τμήματος Μηχανολόγων  
Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής  
ΚΟΥΙΜΑΝΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ  
Αριθμός Μητρώου: 40497

Θέμα: ΜΙΚΡΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΓΙΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ.  
ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ  
ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ

*(Small gas turbines for CHP. Repair of the power turbine and measurements in a laboratory gas turbine.)*



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΑΝΔΡΕΑΣ ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ 2018

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ABSTRACT .....	3
<b>1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ</b>	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	4
1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	7
1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	9
1.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	10
1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	12
<b>2. ΜΙΚΡΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ (MICROTURBINES)</b>	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.....	22
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	25
2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	26
2.4 ΣΥΘΕΣΗ ΜΙΚΡΟΥ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	28
2.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	50
2.6 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	51
2.7 ΤΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	52
2.8 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ CAPSTONE C30.....	53
<b>3. ΚΑΥΣΙΜΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ</b>	
3.1 ΕΥΕΛΙΞΙΑ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	56
3.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.....	57
3.3.1 ΚΛΑΣΣΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	58
3.3.2 ΜΗ ΚΛΑΣΣΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	59
3.4.1 ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ.....	60
3.4.2 ΟΦΕΛΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	61
3.4.3 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	62
3.4.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	63
3.5 ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	64
3.6 ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	66
3.7 ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	67
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	
4.1 ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ.....	68
4.2 ΕΠΙΣΚΕΥΗ - ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	72
4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	77
4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	79
4.5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	81
4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	82
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και κατανόηση της λειτουργίας μικρών αεριοστρόβιλων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας τους οποίους τους ονομάζουμε μικροστροβίλους. Η χρήση τέτοιων μικροστροβίλων για καύση καυσίμων χαμηλού θερμικού περιεχομένου και αερίων από βιομάζες όπως βιοαέριο και συνθετικό αέριο. Τα οφέλη και πλεονεκτήματα αυτών στην κοινωνία και τον κόσμο. Επίσης η επισκευή του εργαστηριακού αεριοστρόβιλου DIDACTA T200 λόγω προβλήματος στο στρόβιλο ισχύος αλλά και η συντήρηση του. Μετά την επισκευή θα εκκινήσουμε τον εργαστηριακό αεριοστρόβιλο και θα πάρουμε μετρήσεις σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

## **Abstract**

The purpose of this dissertation is to study and understand the operation of small gas turbines for the generation of electricity and heat, which we call micro-turbines. The use of such micro-turbines for combustion of low-calorific fuels and biomass gases such as biogas and synthetic gas. The benefits and advantages of these in society and the world. Also the repair of the DIDACTA T200 gas turbine due to a turbine power problem and its maintenance. After the repair we will launch the laboratory gas turbine and we will take measurements in various operating modes

# 1.ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπααραγωγή . Συμπααραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας. Επίσης πρέπει να διευκρινιστεί ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel ) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.

Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπααραγωγής φθάνει το 80-85%. Η Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας ( ΣΗΘ ) δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη τεχνολογία αλλά περισσότερο μια εφαρμογή τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης, καθώς και για μηχανική και ηλεκτρική ενέργεια των τελικών καταναλωτών. Λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν αναπτυχθεί νέες διατάξεις των συστημάτων ΣΗΘ που τα καθιστούν οικονομικά συμφέροντα σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Οι νέες γενιές των στροβίλων, κυψελών καυσίμου και παλινδρομικών μηχανών συνιστούν το αποτέλεσμα εντατικής και συνδυασμένης έρευνας, ανάπτυξης και επίδειξης, τόσο από ινστιτούτα όσο και από τη βιομηχανία. Τα προηγμένα υλικά και οι τεχνικές σχεδίασης μέσω Η/Υ έχουν αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του εξοπλισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα τα κόστη και τις εκπομπές ρύπων.



Σχήμα 1. Συμβατικός τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 2. Συμβατικός τρόπος παραγωγής θερμότητας

Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τη φύση της μη αποδοτική, αφού μετατρέπεται μόνο το ένα τρίτο της ενέργειας των καυσίμων σε ωφέλιμη ενέργεια. Η σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας με τη ΣΗΘ οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμων και σε μειωμένες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η ΣΗΘ αποτελεί μια οικονομικά παραγωγική προσέγγιση για τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων μέσω της πρόληψης της ρύπανσης, ενώ ο παραδοσιακός έλεγχος της ρύπανσης που επιτυγχάνεται απλά μέσω της επεξεργασίας των καυσαερίων δεν παρέχει κανένα οικονομικό όφελος και, στην πραγματικότητα, μειώνει την απόδοση και την ωφέλιμη παραγωγή ενέργειας. Η συνολική απόδοση του συστήματος προκύπτει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας. Δεδομένου ότι από ένα σύστημα ΣΗΘ προκύπτουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, ο καθορισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι πιο σύνθετος από ότι στα απλά συστήματα. Το όλο σύστημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως δύο υποσυστήματα, το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (συνήθως μια μηχανή ή ένας στρόβιλος) και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (συνήθως κάποιος τύπος λέβητα). Η απόδοση του συνολικού συστήματος προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας.

Τα αποδοτικότερα συστήματα ΣΗΘ με πάνω από 80% συνολικό βαθμό απόδοσης είναι εκείνα που ικανοποιούν μεγάλη θερμική ζήτηση με την ταυτόχρονη παραγωγή σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Όσο αυξάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία της ανακτώμενης ενέργειας, τόσο μειώνεται ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς τη θερμότητα. Η μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική για τα οικονομικά της ΣΗΘ, καθώς η διάθεση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά είναι τεχνικά ευκολότερη από ότι είναι στην περίπτωση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας. Εντούτοις, την περίοδο αυτή υπάρχουν ακόμη εμπόδια στη διανομή της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά.



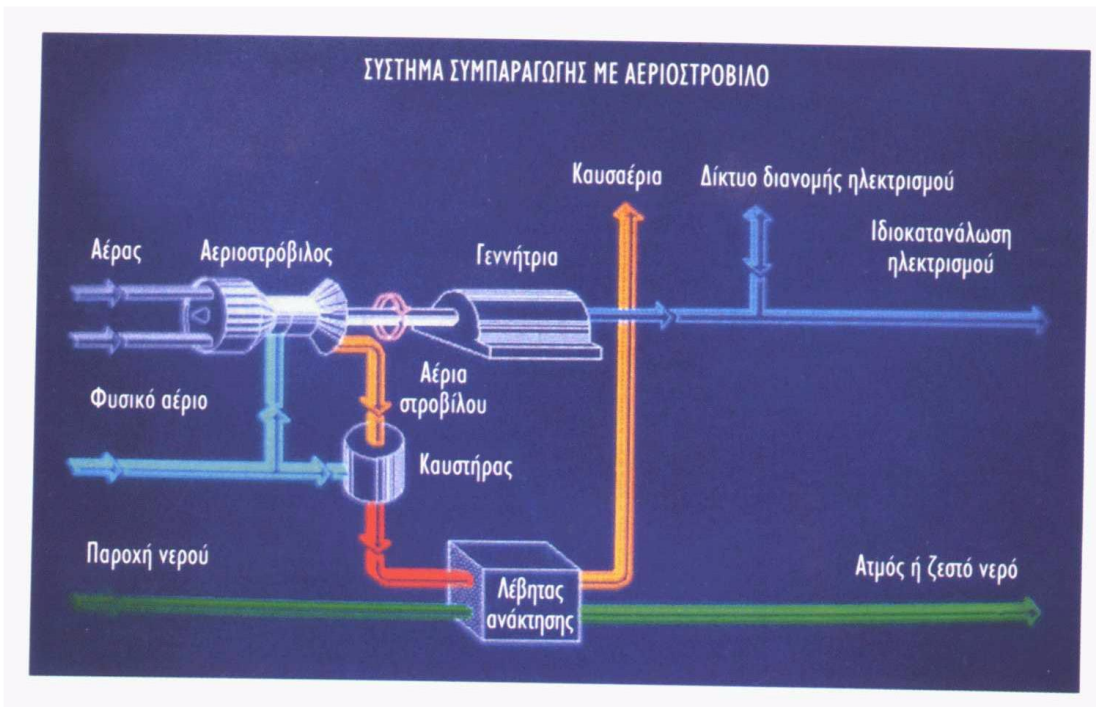
Σχήμα 3. βαθμός απόδοσης συστήματος ΣΗΘ

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η Συμπαραγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. γύρω στα 1890. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ατμολέβητα-στρόβιλο, που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν συμπαραγωγικές. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% του ηλεκτρισμού, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής. Κατόπιν ακολούθησε κάμψη κυρίως λόγω της ανάπτυξης των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού, που προσέφεραν σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, και τη διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές, που έκανε τη λειτουργία λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα. Συνεχίζοντας με το παράδειγμα των Η.Π.Α., η βιομηχανική συμπαραγωγή μειώθηκε στο 15% του όλου δυναμικού ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% μέχρι το 1974. Η πορεία αυτή έχει πλέον αντιστραφεί όχι μόνον στις Η.Π.Α. αλλά και σε χώρες της Ευρώπης, στην Ιαπωνία κ.α., γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην απότομη αύξηση των τιμών των καυσίμων, από το 1973 και μετά.

Η ανοδική πορεία της συμπαραγωγής συνοδεύτηκε από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή, συντελεί στη μείωση και των εκπεμπόμενων ρύπων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα, γεγονός το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του είδους της μονάδας και του πρόσθετου εξοπλισμού της. Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς: σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, βιομηχανικός, εμπορικός ή κτιριακός και αγροτικός τομέας. Η μεγάλη σημασία που έχει η συμπαραγωγή στην εξοικονόμηση φυσικών και οικονομικών πόρων αλλά και το γεγονός ότι η λειτουργία των συστημάτων έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρισμού μιας χώρας, είναι αιτίες ώστε η συμπαραγωγή να αποτελεί αντικείμενο νομοθετικών, οικονομικών, και άλλων ρυθμίσεων εκ μέρους της πολιτείας. Από την άλλη πλευρά, η εξεύρεση πόρων για τις σχετικές επενδύσεις και οι οικονομικές συνθήκες, κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει μια μονάδα συμπαραγωγής, είναι κρίσιμης σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.





Σχήμα 4. Σύστημα Συμπαραγωγής αεριοστρόβιλου

### 1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Αρχικά η συμπαραγωγή βελτιώνει την παροχή ενέργειας προς όλους τους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα ωφελεί και την Εθνική Οικονομία, αφού έχει αυξημένη απόδοση μετατροπής και χρήσης ενέργειας. Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι η πλέον αποτελεσματική και αποδοτική μορφή ηλεκτροπαραγωγής με την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής ενέργειας.

Επίσης τα διάφορα συστήματα ΣΗΘ εκπέμπουν μικρότερη ποσότητα ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα, οι όποιοι είναι υπεύθυνοι για την κλιματική αλλαγή. Με τη χρήση των συστημάτων ΣΗΘ εξοικονομούνται πόροι, παρέχοντας πρόσθετη ανταγωνιστικότητα στη βιομηχανία και στις εμπορικές επιχειρήσεις, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα παρέχονται σε χαμηλότερες τιμές. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις συμπαραγωγής μπορεί να εφαρμοστεί η τηλεθέρμανση με πολλά οφέλη σε τοπικές κοινωνίες και τον αγροτικό τομέα. Υπάρχει βελτιωμένη ασφάλεια στην παροχή που μειώνει τις πιθανότητες οι καταναλωτές να μείνουν χωρίς ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια.

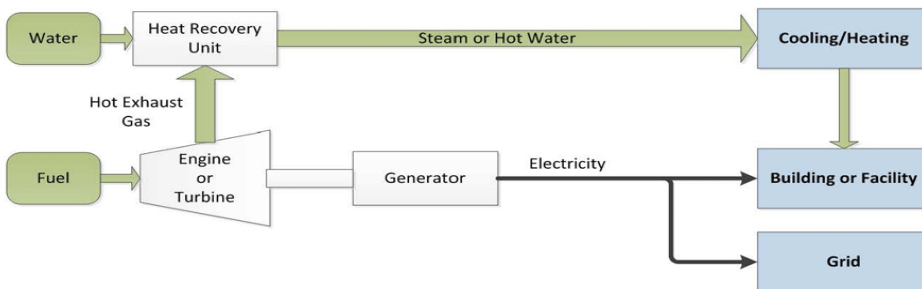
Λόγο της οικονομίας καυσίμου των συγκεκριμένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μειώνεται η εξάρτηση καυσίμου από εισαγωγές.

Αυξημένη απασχόληση, αφού η ανάπτυξη των συστημάτων ΣΗΘ δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας. Οι σταθμοί ΣΗΘ σχεδιάζονται να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών, παρέχοντας υψηλή απόδοση, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς της ενέργειας και αυξάνοντας την ευελιξία στη χρήση του ηλεκτρικού συστήματος. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όταν το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται σαν κύριο καύσιμο.

## 1.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

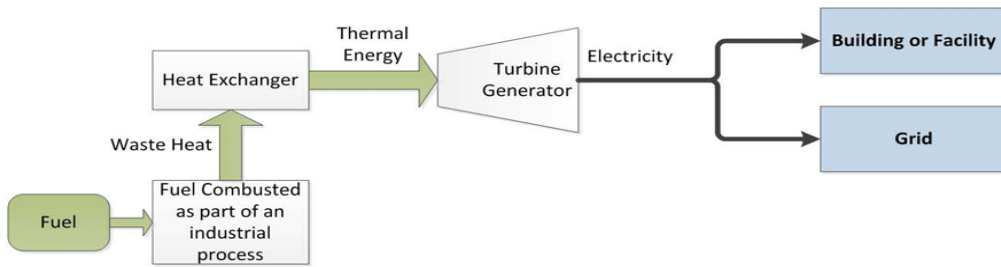
Τα περισσότερα συστήματα Συμπαγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως συστήματα αιχμής (topping systems ) είτε ως συστήματα βάσεως (bottoming synthetic). Στα συστήματα αιχμής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται πρωτίστως για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων ή ακόμη και για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας (συνδυασμένοι κύκλοι). Στα συστήματα βάσεως παράγεται πρωτίστως θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας όπως για παράδειγμα σε κάμινους χαλυβουργιών, ναυουργιών και εργοστασίων σκυροδέματος, κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας, όπου παράγεται ατμός, ο οποίος θέτει σε λειτουργία έναν αμοστρόβιλο και, εν συνεχεία, μία γεννήτρια. Είναι ακόμη δυνατόν τα θερμά αέρια να διοχετευθούν σε αεριοστρόβιλο, χωρίς την παρεμβολή λέβητα.

### TOPPING SYSTEMS



Σχήμα 5. Σύστημα Αιχμής

## BOTTOMING SYSTEMS



Σχήμα 6. Σύστημα Βάσεως

## 1.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η επιλογή συστήματος συμπαραγωγής στην πράξη έχει πάρα πολλές παραλλαγές και παραμέτρους οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, βιομάζα, βιοαέριο, λιγνίτης όσο και στους σκοπούς λειτουργίας των εν λόγω εγκαταστάσεων, δηλαδή αν προορίζονται για την παραγωγή ρεύματος ή την παραγωγή θερμότητας, στις συνθήκες τις οποίες θα εγκατασταθούν και τη ζήτηση και το φορτίο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Οι βασικές τεχνολογίες Σ.Η.Θ. που προκύπτουν με βάση τα χρησιμοποιούμενα κυκλώματα ισχύος και είναι οι παρακάτω:

1) Συμπαραγωγή με ατμοστρόβιλο: Χρησιμοποιείται ως καύσιμο άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, στερεή βιομάζα, απόβλητα, τύρφη και πυρηνικά καύσιμα. Ο ατμός είναι το μέσο με το οποίο η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.

2) Συμπαραγωγή με αεριοστρόβιλο: Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι τα μόνα κατάλληλα καύσιμα. Το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι τα καυσαέρια του θαλάμου καύσης.

3) Συμπαραγωγή με εμβολοφόρο μηχανή: Η χημικά δεσμευμένη ενέργεια του φυσικού αερίου ή του πετρελαίου diesel, μετασχηματίζεται άμεσα με την καύση σε μηχανική ενέργεια.

4) Συμπαραγωγή με μηχανή STIRLING: Το συγκεκριμένο σύστημα εργάζεται με βάση το θερμοδυναμικό κύκλο, ο οποίος αποτελείται από 4 αντιστρεπτές μεταβολές, δύο ισόογκες και δύο ισοθερμοκρασιακές.

5) Σύστημα συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου στο οποίο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται απευθείας από την χημική ενέργεια του καυσίμου χωρίς να μεσολαβεί κάποιος θερμοδυναμικός κύκλος. Έτσι δεν περιορίζεται η απόδοσή τους από τους περιορισμούς που θέτει ο κύκλος του Carnot.

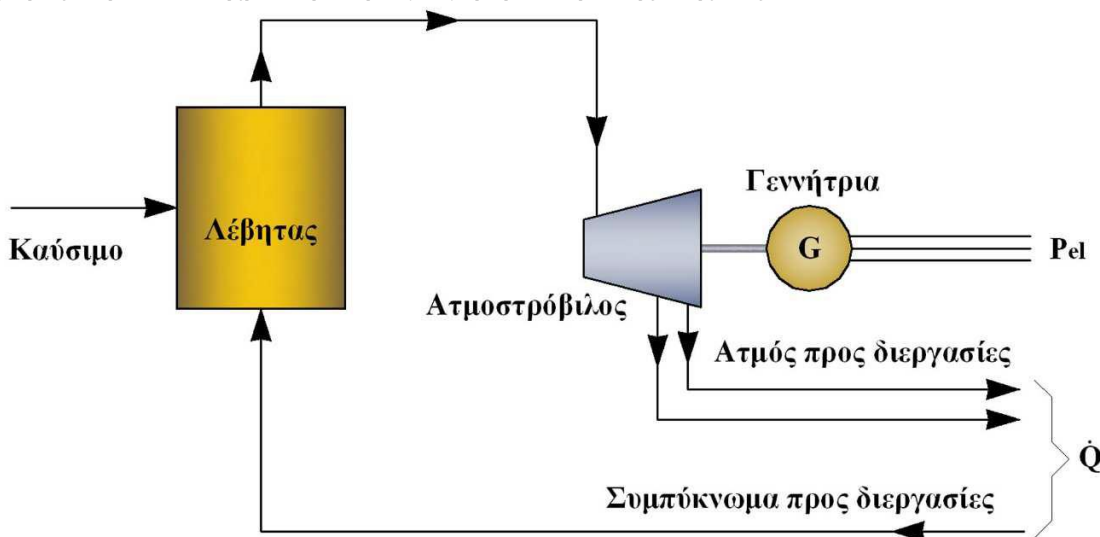
6) Μικροστρόβιλος συμπαραγωγής ( microturbine ) οποίος λειτουργεί κατά κύριο λόγο με φυσικό αέριο μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και άλλα καύσιμα όπως, diesel, βιοαέριο, και αιθανόλη. Τον διέπουν οι ίδιες αρχές λειτουργίας ενός αεροστροβίλου.

## Συστήματα ΣΗΘ ατμοστρόβιλου

Τα συστήματα Σ.Η.Θ. με ατμοστρόβιλο είναι τα πλέον διαδεδομένα, κατάλληλα για απαιτήσεις ισχύος από 500kWe έως 1.000MWe. Το συγκριτικό πλεονέκτημα, που εμφανίζουν ως προς τις άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες, είναι η δυνατότητα καύσης οποιουδήποτε καυσίμου, ακόμη και στερεά απόβλητα τα οποία καίγονται σε ειδικούς λέβητες, εφοδιασμένους με συστήματα κατακρατήσεως ή και εξουδετερώσεως ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Σε περιπτώσεις μικρών αποκεντρωμένων συστημάτων, η καύση βιοκαυσίμων (π.χ. στερεής βιομάζας) μπορεί να οδηγήσει σε εγγυημένη παροχή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές προς την κατανάλωση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Χωρίζεται στα συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντιθλίψεως και ατμοστρόβιλο απλουστεύσεως.

α) Τα συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντιθλίψεως παρουσιάζουν, σε σχέση με αυτά του ατμοστρόβιλου αποδεσμεύσεως τα εξής πλεονεκτήματα:

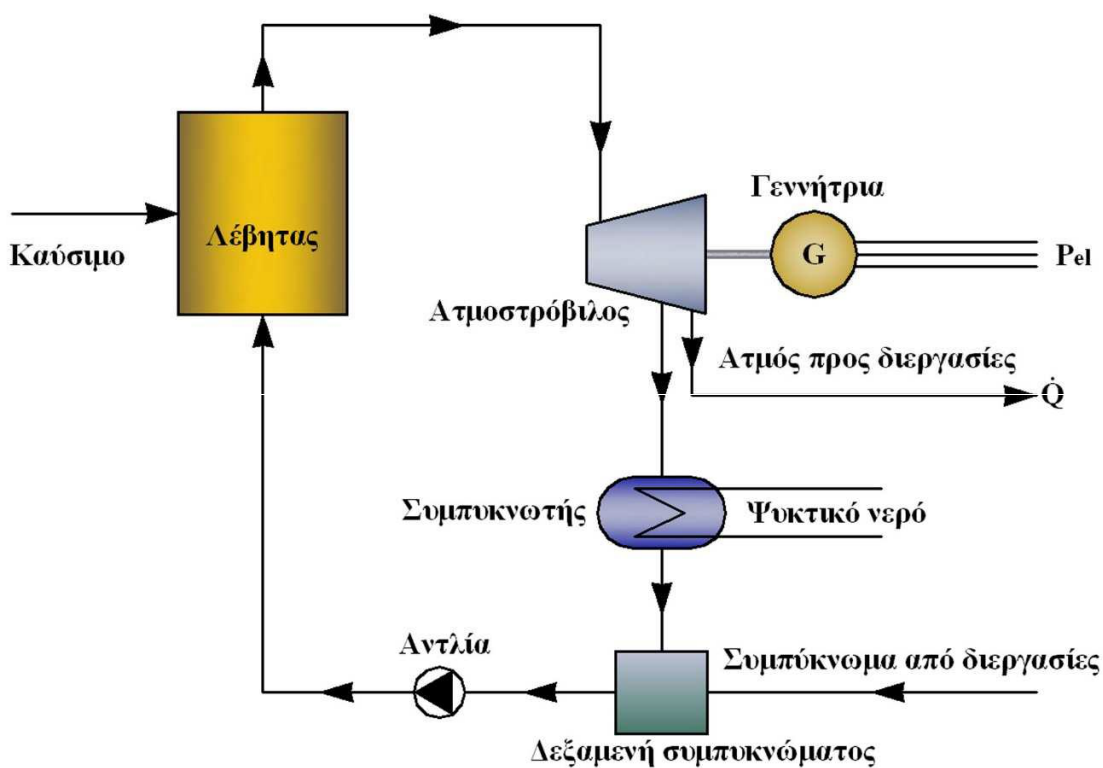
- 1) απλή μορφή, 2) μικρότερο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης,
- 3) μειωμένη ή και καθόλου ανάγκη σε ψυκτικό υγρό 4) υψηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης (περίπου 85%), κυρίως λόγω του ότι δεν αποβάλλεται θερμότητα στο περιβάλλον μέσω ψηκτρών. Από την άλλη μεριά, παρουσιάζουν το σημαντικό μειονέκτημα ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Κατά συνέπεια η παραγωγή θερμικής ισχύος είναι αδύνατη χωρίς την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.



Σχήμα 7. Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντιθλίψεως

β) Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομαστεύσεως

Και στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με όμοιο τρόπο με αυτό στην περίπτωση των συστημάτων με ατμοστρόβιλους αντιθλίψεως. Η διαφορά μεταξύ των δύο υλοποιήσεων εμφανίζεται στο ότι στην περίπτωση ατμοστρόβιλου απομαστεύσεως, ποσότητα του ατμού απομαστεύεται δηλαδή εξάγεται από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στρόβιλου, η οποία χρησιμεύει για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού και, συγχρόνως, παρέχεται θερμική ισχύς στον εναλλάκτη, ενώ ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή της τάξης των 0,05 – 0,10bar.

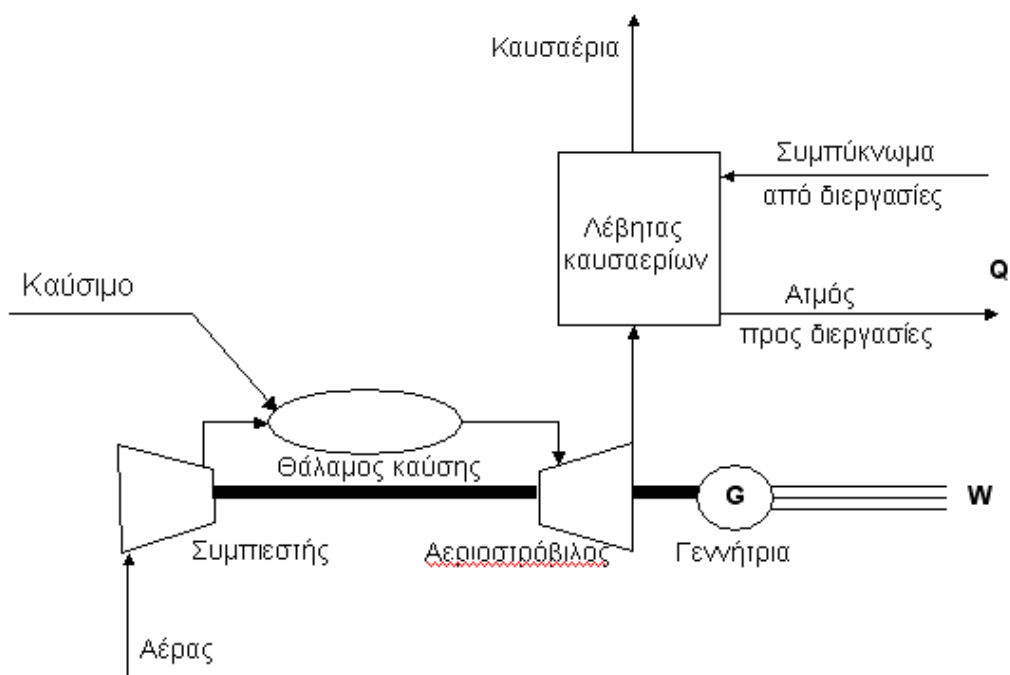


Σχήμα 8. Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομαστεύσεως

## Συστήματα ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο

Τα συστήματα Σ.Η.Θ με αεριοστρόβιλο χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων Σ.Η.Θ. με αεριοστρόβιλο, οι ανοιχτού και κλειστού τύπου. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι συνήθως φυσικό αέριο, υγραέριο και ελαφρύ πετρέλαιο. Τα συστήματα αυτά κατασκευάζονται για ισχύ από 100 έως 30000 kW και παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 25% με 35%, θερμικό βαθμό απόδοσης 40% με 50% και ολικό βαθμό απόδοσης 70% με 80% και ο μέσος χρόνος ζωής τους είναι περίπου 15 με 20 έτη.

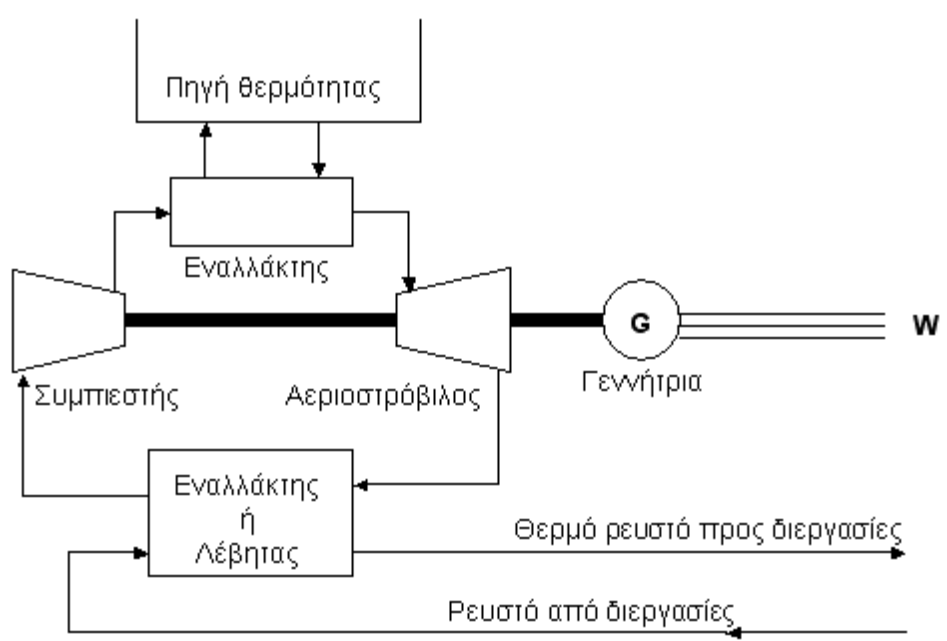
α) Στους αεριοστρόβιλους ανοιχτού κύκλου ο αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσεως. Τα καυσαέρια οδηγούνται στον αεριοστρόβιλο, όπου εκτονώνονται, απελευθερώνοντας ενέργεια με την οποία κινείται η ηλεκτρογεννήτρια, και διαφεύγουν από αυτόν σε θερμοκρασία 300 – 600 C. Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων σε ένα σύστημα συμπαραγωγής μπορεί να γίνει με άμεση χρήση τους σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, ξήρανση κλπ) και με τη διοχέτευσή τους σε μονάδες ανακτήσεως θερμότητας, οι οποίες ονομάζονται λέβητες ανάκτησης θερμότητας ή απλώς λέβητες καυσαερίων. Σε αυτούς παράγεται ατμός υψηλής ενθαλπίας, ο οποίος είναι κατάλληλος για παραγωγικές διεργασίες, όπως θερμικές, αλλά και για κίνηση ατμοστρόβιλου, συνδεδεμένου με γεννήτρια ή κάποιο άλλο μηχάνημα.



Σχήμα 9 . Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου



β) Στα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου το εργαζόμενο μέσο (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Αυτό θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδό του στον αεριοστρόβιλο, και ψύχεται μετά την έξοδο του από αυτόν. Οι αεριοστρόβιλοι κλειστού κύκλου παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους αεριοστρόβιλους ανοιχτού τύπου, όπως είναι η υψηλότερη διαθεσιμότητα χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντηρήσεως, λόγω της καθαρότητας του εργαζόμενου ρευστού ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης δύναται να αυξηθεί με την ύπαρξη αναγεννητικής προθερμάνσεως του εργαζόμενου μέσου.



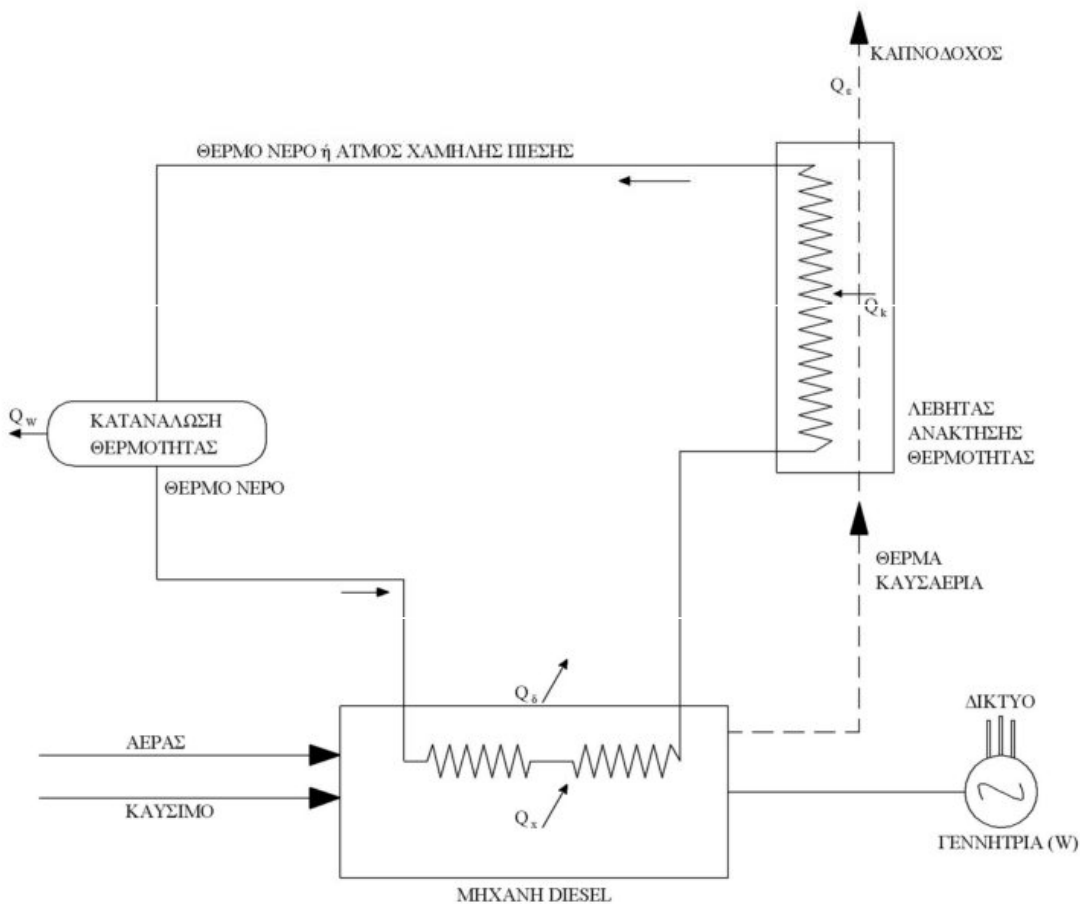
Σχήμα 10. Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου

## Συστήματα συμπαραγωγής με εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσεως

Οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως (ΜΕΚ) χρησιμοποιούνται, συνήθως, για χαμηλής ισχύος συστήματα συμπαραγωγής (ονομαστική ισχύς 20 –1.000kWe), ενώ για μεγαλύτερες επιδόσεις προτιμούνται οι αεριοστρόβιλοι.

Διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες συστημάτων συμπαραγωγής με ΜΕΚ:

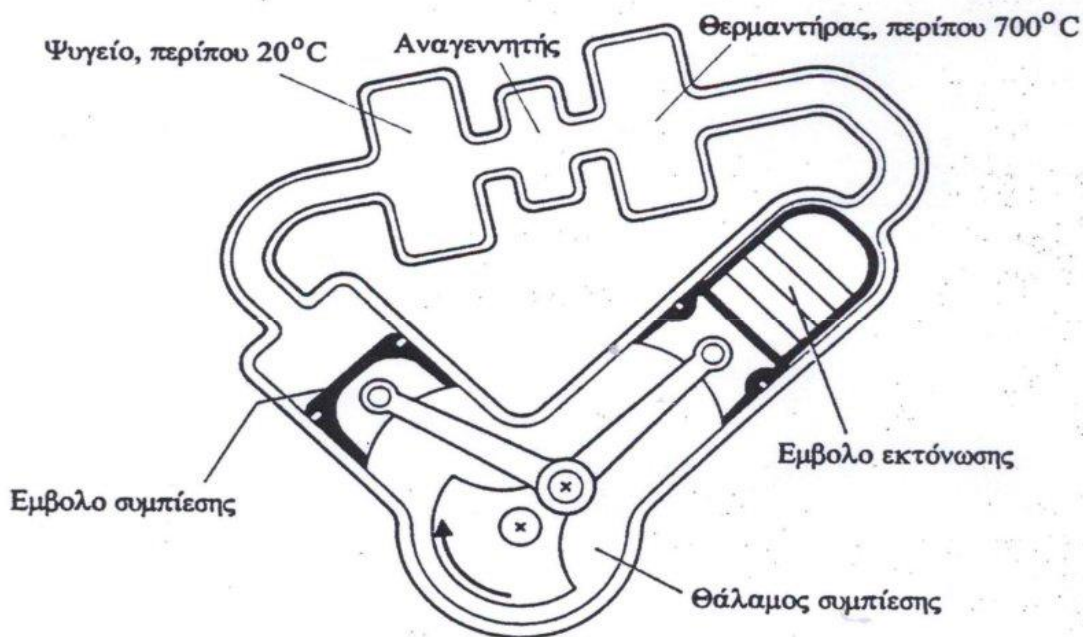
1. μονάδες πολύ μικρής ισχύος με αεριομηχανή (15 – 250kW) ή κινητήρα Diesel αυτοκινήτων (75 –250kW), 2. μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel ισχύος έως 1.000kW, 3. συστήματα μέσης ισχύος με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel ισχύος έως 6.000kW, 4. συστήματα μεγάλης ισχύος με κινητήρα Diesel άνω των 6.000kW. Ως αεριομηχανές ( gas engines ) εννοούνται οι εμβολοφόρες ΜΕΚ που λειτουργούν με αέριο, π.χ. φυσικό αέριο, βιοαέριο κλπ.



Σχήμα 11. Σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα DIESEL

## Σύστημα συμπαραγωγής με Μηχανή STIRLING

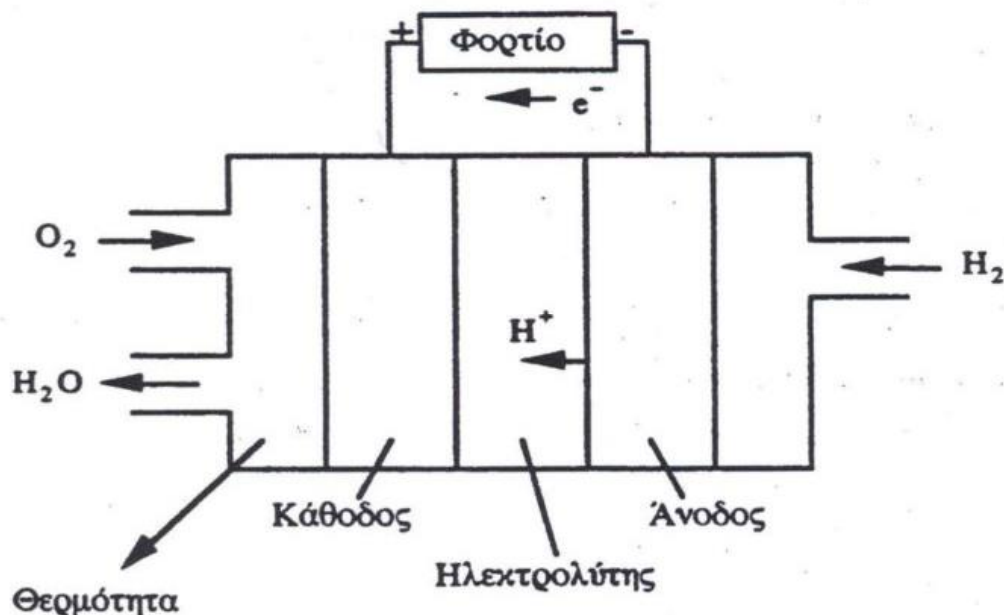
Η συμπαραγωγή με μηχανές Stirling, παρότι μέχρι σήμερα δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, αρχίζει να κερδίζει έδαφος λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι μηχανές αυτές, σε σχέση με τα συστήματα κινητήρων Diesel, αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων, διότι ο κύκλος Stirling πλησιάζει προς τον κύκλο Carnot. Ο κινητήρας Stirling ονομάζεται και μηχανή εξωτερικής καύσης. Κατά τη λειτουργία του το αέριο υδρογόνο ή ήλιο συμπιέζεται και εκτονώνεται σε διάταξη κυλίνδρου δύο εμβόλων, με αποτέλεσμα την περιστροφή στροφαλοφόρου άξονα. Το αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας, χωρίς να συμμετέχει στην καύση. Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει τη χρήση διάφορων καυσίμων όπως υγρά και αέρια καύσιμα, άνθρακα, αέρια και υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα, ακόμα και απορρίμματα.



Σχήμα 12. Σύστημα συμπαραγωγής με μηχανή Stirling

## Σύστημα συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου

Το σύστημα ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με τη χρήση υδρογόνου και οξυγόνου, τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους, παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ παράλληλα αναπτύσσεται ηλεκτρική τάση, η οποία προκαλεί ροή ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα δηλαδή φορτίο. Η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι ότι έχουν αρθρωτή δομή για την επίτευξη μονάδων με επιθυμητή ισχύ και υψηλό βαθμό απόδοσης. Το συγκεκριμένο σύστημα συμπαραγωγής εκπέμπει χαμηλούς ρύπους και στάθμη θορύβου βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Το αρνητικό του συστήματος είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η μικρή διάρκεια ζωής του γύρω στα πέντε έτη. Οι κυψέλες καυσίμου κατασκευάζονται από 3 kW και άνω και παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 20÷30%, θερμικό βαθμό απόδοσης 25÷35% και ολικό βαθμό απόδοσης συστήματος 45÷60%. Στο σύστημα συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας τόσο μεγαλύτερο είναι και το ωφέλιμο θερμικό φορτίο το οποίο μπορεί να ανακτηθεί από τον εναλλάκτη.

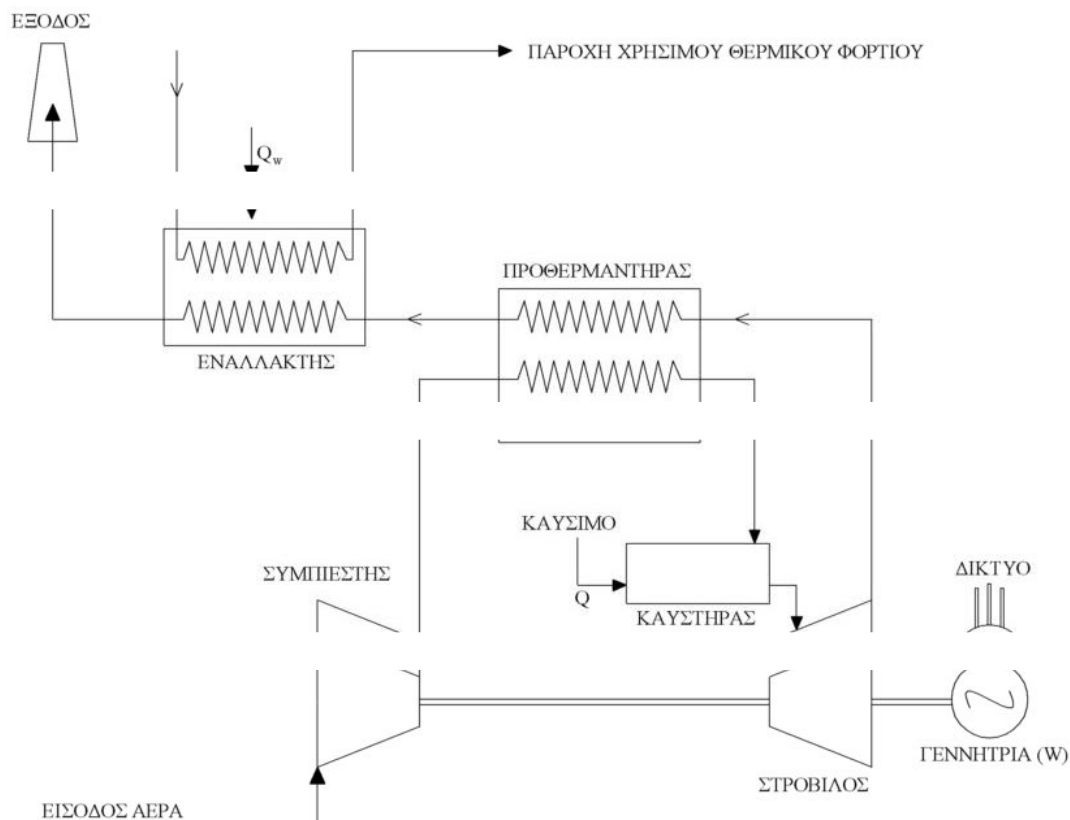


Σχήμα 13. Σύστημα συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου

## Μικροστρόβιλος (microturbine)

Το σύστημα ΣΗΘ με μικροστρόβιλο είναι κατά κανόνα μονάδα μικρού μεγέθους, υψηλής ταχύτητας και συμπεριλαμβάνει τον αεριοστρόβιλο (gas turbine), το συμπιεστή (compressor), τη γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο. Τυπικά, λειτουργεί με καύσιμο το φυσικό αέριο, αλλά δέχεται για τη λειτουργία της και άλλα βιομηχανικά καύσιμα, όπως προπάνιο, ελαφρύ πετρέλαιο (diesel), κηροζίνη και καύσιμα από βιομάζα. Κατά τη λειτουργία της μηχανής, ο αέρας εισέρχεται στο συμπιεστή και μετά από τη συμπίεσή του διέρχεται από τον προθερμαντήρα, όπου η θερμοκρασία αυξάνεται από τα καυσαέρια εκτόνωσης. Στη συνέχεια, ο αέρας εισέρχεται στον καυστήρα, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο, το οποίο αναφλέγεται και καίγεται. Ο αναφλεκτήρας χρησιμοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια της εκκίνησης και κατόπιν η φλόγα είναι αυτοσυντηρούμενη. Τα αέρια μετά την καύση διέρχονται από το στρόβιλο μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανική. Τα αέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο διέρχονται από τον αναθερμαντήρα και στη συνέχεια στον εναλλάκτη θερμότητας (θερμαντική στήλη) για την πρόσδοση θερμότητας και τη θέρμανση νερού.

Τα συστήματα ΣΗΘ με μικροστροβίλους κατασκευάζονται για ισχύ 25 έως 200 kW και παρουσιάζουν ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 25% με 35%, θερμικό βαθμό απόδοσης 40% με 50% και ο μέσος χρόνος ζωής είναι περίπου 15 έτη. Τη λειτουργία των μικροστροβίλων (microturbines) θα την αναλύσουμε σε επόμενη ενότητα παρακάτω.



Σχήμα 14. Σύστημα συμπαραγωγής με microturbine

## 2. ΜΙΚΡΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ (MICROTURBINES)

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ

Οι μικροστρόβιλοι ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία των αεριοστρόβιλων και διέπονται από τις ίδιες αρχές λειτουργίας. Οι αεριοστρόβιλοι γενικότερα έχουν εξαπλωθεί σε εφαρμογές, όπου καθοριστικές παράμετροι στην επιλογή της μονάδας ισχύος είναι η ικανότητα παραγωγής μεγάλης ισχύος σε συνδυασμό με μικρό βάρος, υψηλή διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και θερμική απόδοση. Τέτοιες εφαρμογές, είναι η πρόωση αεροπλάνων, ελικοπτέρων, πλοίων, η παραγωγή ισχύος σε αντλίες αγωγών πετρελαίου, φυσικού αερίου και φυσικά η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Οι αεριοστρόβιλοι έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Είναι μία μηχανή εσωτερικής καύσης ΜΕΚ συνεχόμενης ροής, που συνεπάγεται μεγάλη παραγωγή ισχύος σε σχέση με το μέγεθος ή το βάρος της. Ειδικά στους αεροπορικούς κινητήρες ο λόγος παραγόμενης ώσης ανά μονάδα βάρους είναι από πέντε έως και εννέα φορές μεγαλύτερος σε σχέση με τον εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης αντίστοιχου βάρους. Σαν ΜΕΚ συνεχόμενης ροής χαρακτηρίζεται επίσης από την απουσία παλινδρομικών κινήσεων, δηλαδή απουσία αλλαγής της φοράς κίνησης των κινούμενων τμημάτων και μείωση τριβόμενων τμημάτων, που με τη σειρά της συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση λιπαντικού.

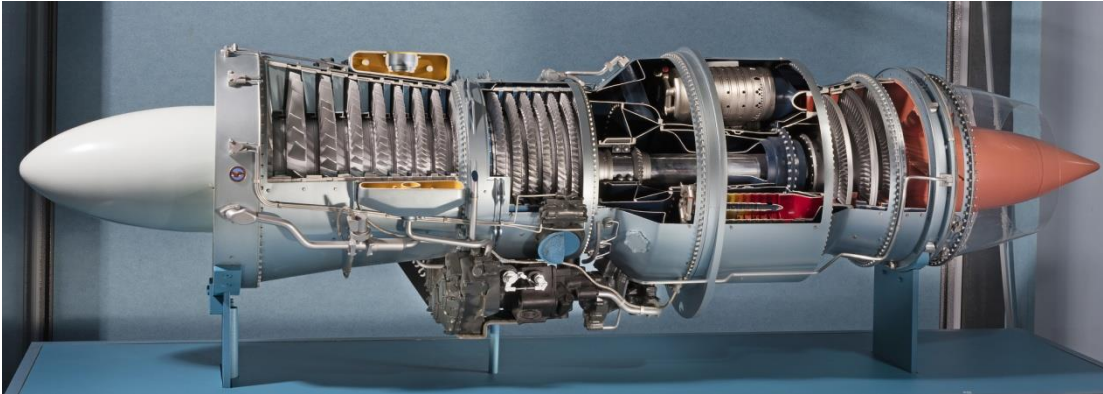
Ο βαθμός θερμικής απόδοσης του απλού θερμοδυναμικού κύκλου είναι της τάξης του 35%-45%. Ανάλογα την διαμόρφωση όμως μπορεί να φτάσει σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές ειδικά εάν χρησιμοποιηθούν σε συνδυαστικά συστήματα. Τα καύσιμα μπορεί να είναι είτε υγρά όπως τα προϊόντα διύλισης του πετρελαίου όπως είναι τα αεροπορικά καύσιμα (κηροζίνη), το βιοντίζελ είτε αέρια όπως το φυσικό αέριο, αεριοποιημένος άνθρακας και το βιοαέριο. Τέλος όσον αφορά τα καυσαέρια, είναι σχετικά μειωμένα, ειδικά με την εφαρμογή στον θάλαμο καύσης, σύγχρονων τεχνολογιών περιορισμού τους.

Τα μειονεκτήματα των μικροστρόβιλων είναι η χαμηλή απόδοση σε συνθήκες λειτουργίας μερικού φορτίου και ισχύος. Λειτουργία που επηρεάζεται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, ταχύτητα αέρα εισόδου και η επιρροή αυτή γίνεται πιο έντονη όταν χρησιμοποιείται σε αεροσκάφη. Παρατηρείται μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου στην βασική τους έκδοση σε σχέση με τεχνολογικά προηγμένες εμβολοφόρους μηχανές εσωτερικής καύσης. Επίσης το κόστος και ο χρόνος κατασκευής είναι μεγάλο. Υπάρχει μεγάλος κίνδυνος πρόκλησης ζημιάς στους αεροπορικούς αεριοστρόβιλους κυρίως λόγω αναρρόφησης από την εισαγωγή αέρα ξένων σωμάτων.

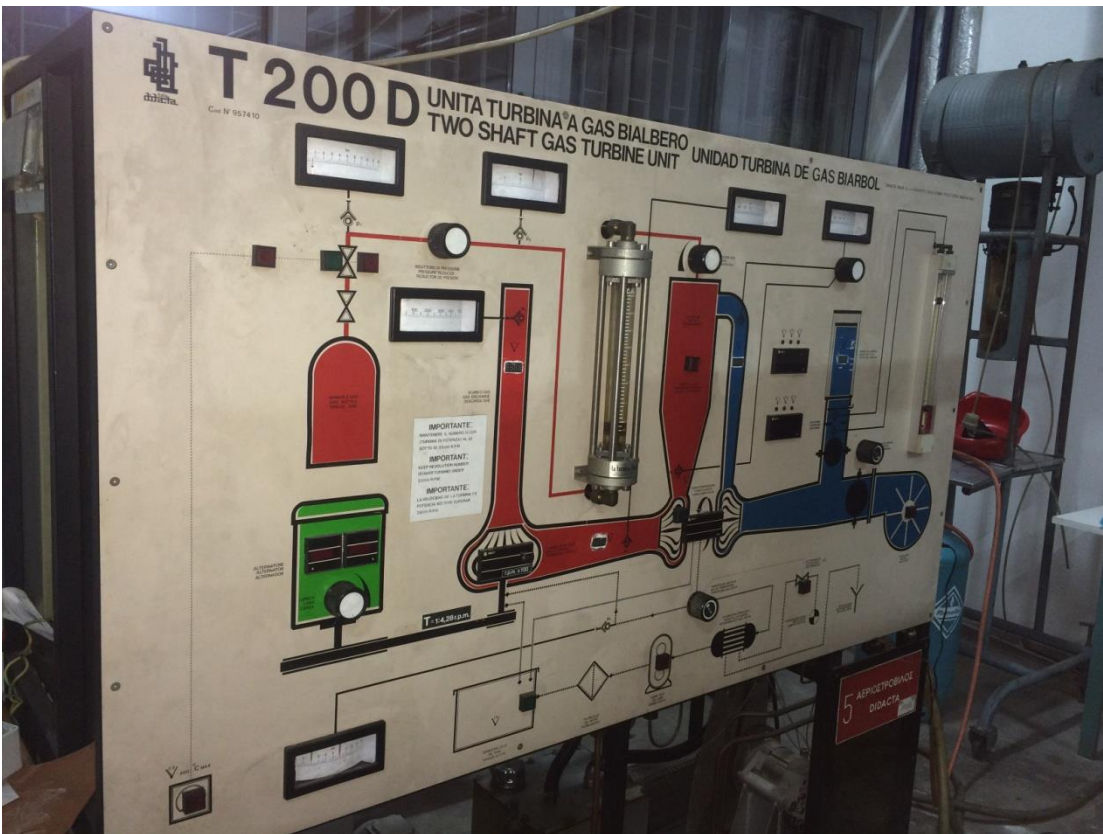
Οι μικροστρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μικρές γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας, που καίνε αέρια και υγρά καύσιμα, για τη δημιουργία υψηλής ταχύτητας περιστροφής μιας ηλεκτρικής γεννήτριας. Η σημερινή τεχνολογία μικροστρόβιλων είναι το αποτέλεσμα της εξελικτικής εργασίας σε μικρές σταθερές και κινητές

τουρμπίνες , σε ανάπτυξη βοηθητικού εξοπλισμού ηλεκτρικής ενέργειας, και στροβιλοσυμπιεστών. Οι μικροστρόβιλοι άρχισαν να δοκιμάζονται γύρω στο 1997 και το 2000 ξεκίνησε η πρώτη εμπορική παραγωγή. Μέρος της επιτυχίας τους οφείλεται στις προόδους της επιστήμης στην ηλεκτρονική, η οποία επιτρέπει ανεπιτήρητη λειτουργία και την εύκολη σύνδεση τους στο υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το εύρος μεγέθους για μικροτουρμπίνες που είναι διαθέσιμες είναι από 30 έως 350 κιλοβάτ (kW), ενώ τα συμβατικά μεγέθη αεριοστρόβιλων κυμαίνονται από 500 kW έως 250 μεγαβάτ (MW). Οι μικροστρόβιλοι λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και, όπως οι μεγαλύτερες τουρμπίνες αερίου, μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ισχύος ή σε συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού δηλαδή συστήματα συμπαραγωγής και είναι σε θέση να λειτουργήσουν σε μια ποικιλία καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, αέρια υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, βιοκαύσιμα, υγρά καύσιμα, όπως βενζίνη, κηροζίνη και ντίζελ όπως και με απόσταγμα πετρελαίου θέρμανσης.





Σχήμα 15. Αεροστρόβιλος σχεδιασμένος για αεροσκάφος



Σχήμα 16. Εργαστηριακός αεροστρόβιλος T200D

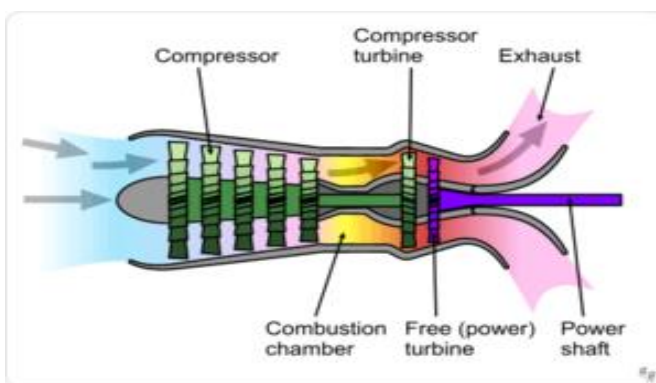
## 2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι μικροστρόβιλοι είναι ιδανικοί για χρήση στις εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, λόγω της ευελιξίας τους κατά τη σύνδεση, τη δυνατότητα να χρησιμοποιούνται παράλληλα ώστε να εξυπηρετήσουν την παραγωγή μεγάλων φορτίων ενέργειας , και τη δυνατότητα να παράσχουν σταθερή και αξιόπιστη ισχύ με χαμηλές εκπομπές ρύπων. Πιο συγκεκριμένα τέτοιες εφαρμογές περιλαμβάνουν: 1) Συστήματα υποστήριξης κορυφής και βάσης ισχύος φορτίου δηλαδή παράλληλο δίκτυο, 2) Συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας συμπαραγωγή ( CHP ), 3)Αυτόνομα συστήματα παραγωγής ισχύος 4)Χρήση ως εφεδρικά συστήματα 5) Κύρια παροχή ισχύος με το υπόλοιπο δίκτυο ως εφεδρεία 6) Λειτουργία ως σύστημα ανάκτησης πόρων. Οι μικροστρόβιλοι σήμερα δραστηριοποιούνται σε εργασίες αξιοποίησης των πόρων όπως πετρέλαιο και φυσικό αέριο , στους τομείς της παραγωγής, της γεωργίας της κτηνοτροφίας, τα ανθρακωρυχεία ,και τις χωματερές, όπου τα αέρια υποπροϊόντα χρησιμεύουν ουσιαστικά ως δωρεάν καύσιμα. Η αξιόπιστη και συνεχής λειτουργία είναι σημαντική δεδομένου ότι αυτές οι τοποθεσίες μπορεί να είναι απομακρυσμένες από το δίκτυο, ή ακόμη και όταν εξυπηρετούνται από το δίκτυο, μπορεί να εμφανίσουν δαπανηρό χρόνο διακοπής όταν η παροχή υπηρεσιών ηλεκτρισμού χάνεται λόγω καιρού, πυρκαγιάς ή άλλων παραγόντων.

Σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας , τα θερμικά απόβλητα των μικροστροβίλων χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού, για τη θέρμανση χώρων, είτε να εξυπηρετήσουν άλλες θερμικές ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου ή μιας βιομηχανικής διεργασίας . Όταν χρησιμοποιούνται σε σταθμούς συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου και ατμοστροβίλου επιτυγχάνουν συνολική θερμική απόδοση της τάξης του 50% – 60 % . Στα εργοστάσια αυτά έχουμε παραγωγή ισχύος αρχικά από αεριοστροβίλο , τα καυσαέρια του οποίου χρησιμοποιούνται για να θερμάνουν νερό , μετατρέποντας το σε ατμό , που με τη σειρά του δίνει κίνηση σε έναν ατμοστροβίλο .

## 2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Οι μικροστροβίλοι αποτελούν μικρές τουρμπίνες αερίου και υπάγονται στη γενικότερη κατηγορία των αεριοστροβίλων . Η συνοπτική διαδικασία λειτουργίας ενός αεριοστροβίλου είναι η εξής: Ο αέρας αναρροφάται από την εισαγωγή (air intake), και συμπιέζεται στα πολλαπλά στάδια του συμπιεστή (compressor) του αεροστροβίλου αυξάνοντας την πίεση και τη θερμοκρασία του .Στη συνέχεια ο συμπιεσμένος αέρας οδηγείται στο θάλαμο καύσης ( Combustion Chamber ) όπου προστίθεται καύσιμο , το οποίο κατά την είσοδο του εκεί αναφλέγεται αρχικά με τη βοήθεια σπινθηριστή για να αρχίσει η διαδικασία της καύσης η οποία είναι συνεχόμενη. Η εκτόνωση των καυσαερίων από τη συνεχή καύση κινεί το στρόβιλο ( gas generator ) που με τη σειρά του περιστρέφει το συμπιεστή μέσω μιας μηχανικής σύνδεσης ενός άξονα. Το υπόλοιπο μέρος της εκτόνωσης αποτελεί το ωφέλιμο έργο εξόδου του κινητήρα .Το έργο αυτό , στους αεροπορικούς κινητήρες παίρνει τη μορφή προωθητικής ενέργειας με τη βοήθεια προωθητικού ακροφυσίου εξαγωγής ή μηχανική ενέργεια ( περιστροφική κίνηση ) συνήθως με τη βοήθεια πρόσθετου στροβίλου ισχύος ( Power Turbine ) ο οποίος με τη σειρά του διοχετεύει την ισχύ σε έναν άξονα. Στους βιομηχανικής χρήσης αεριοστροβίλους η ισχύς μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο μόνο με τη βοήθεια στροβίλου ισχύος. Πολλά μοντέλα μικροστροβίλων χρησιμοποιούν και έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος εκμεταλλεύεται τη θερμότητα των καυσαερίων προκειμένου να αυξήσει τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής , μειώνοντας κατά τον τρόπο αυτό την κατανάλωση καυσίμου .



Σχήμα 17. Μηχανή Αεριοστροβίλου με στρόβιλο ισχύος (POWER TURBINE)

Επίσης ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων διακρίνουμε δύο τύπους μικροστροβίλων. Ο πρώτος είναι μια υψηλής ταχύτητας μονοαξονική μονάδα (single shaft) στην οποία ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι τοποθετημένα στον ίδιο άξονα μαζί με την γεννήτρια . Έτσι ο στρόβιλος παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στο συμπιεστή για να λειτουργήσει . Όταν πρόκειται για βιομηχανικό κινητήρα , ο ίδιος ο στρόβιλος μετατρέπει την περίσσια ενέργεια εκτόνωσης σε ωφέλιμη περιστροφική ενέργεια , μέσω του ενός και μοναδικού άξονα του αεριοστροβίλου σε έναν καθοδηγούμενο μηχανισμό.

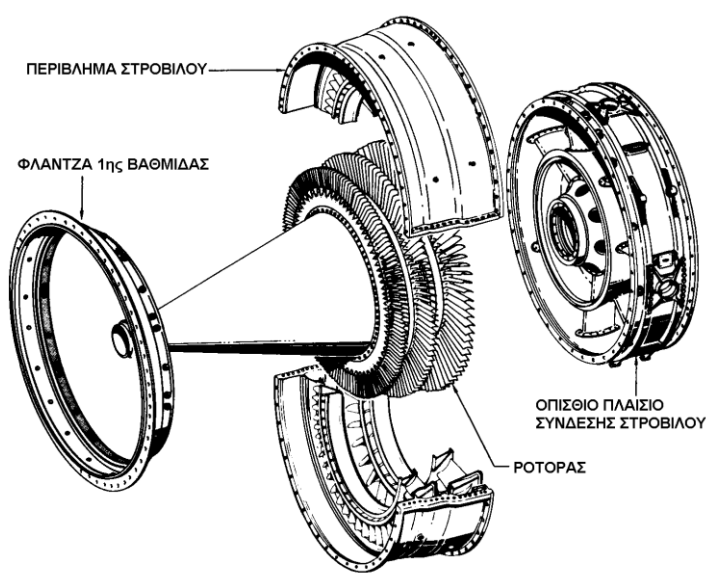
Ο δεύτερος τύπος καλείται στρόβιλος χωριστού άξονα ή διπλού άξονα Στην περίπτωση αυτή , μέσω του πρώτου άξονα , ο στρόβιλος χαμηλής πίεσης , οδηγεί τον συμπιεστή χαμηλής πίεσης , ενώ μέσω του δεύτερου άξονα ο στρόβιλος υψηλής πίεσης οδηγεί το συμπιεστή υψηλής πίεσης . Η πλεονάζουσα ενέργεια εκτόνωσης χρησιμοποιείται μέσω του ίδιου δεύτερου άξονα για να περιστρέψει έναν καθοδηγούμενο μηχανισμό. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει μία τουρμπίνα η οποία περιστρέφεται στις 3600 σ.α.λ. και μία συμβατική γεννήτρια συνδεδεμένη σ'αυτήν μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων .Τα μονοαξονικά μοντέλα εν γένει λειτουργούν σε ταχύτητες που κυμαίνονται από 50.000 έως 120.000 στροφές ανά λεπτό και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια υψηλής συχνότητας, και μεταβλητής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα. Η ισχύς αυτή μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα και στη συνέχεια αντιστρέφεται στα 60 Hertz για εμπορική χρήση.

## 2.4 ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

### Στρόβιλος

Στο στρόβιλο η ενέργεια των θερμών και υψηλής πίεσεως καυσαερίων μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, ένα μεγάλο ποσοστό του οποίου χρησιμοποιείται για την κίνηση του συμπιεστή και των λοιπών παρελκόμενων της μηχανής ενώ το υπόλοιπο απολαμβάνεται ως ωφέλιμο έργο άξονα.

Ο στρόβιλος είναι ένα εξάρτημα το οποίο φέρει πτερύγια στο εξωτερικό του και το οποίο μετατρέπει σε μηχανική ισχύ την ενέργεια εκτόνωσης των καυσαερίων. Ανάλογα με το πού διαθέτουν τη μηχανική ισχύ τους, διακρίνονται δυο τύποι στρόβιλων, στρόβιλος συμπιεστή ( Compressor Turbine ) ο οποίος παρέχει ισχύ κυρίως για την κίνηση του συμπιεστή και ο στρόβιλος ισχύος ( Power Turbine ) που συναντάται κυρίως στους βιομηχανικούς αεροστρόβιλους. Οι δυο στρόβιλοι είναι συνδεδεμένοι αεροδυναμικά και όχι μηχανικά δηλαδή ο στρόβιλος ισχύος λαμβάνει το μέρος της δύναμης εκτόνωσης των καυσαερίων από το στρόβιλο του συμπιεστή παράγοντας έργο. Με αποτέλεσμα να δίνει κίνηση σε ένα καθοδηγούμενο μηχανήμα όπως γεννήτρια, αντλία κτλ.



Σχήμα 18. Στρόβιλος

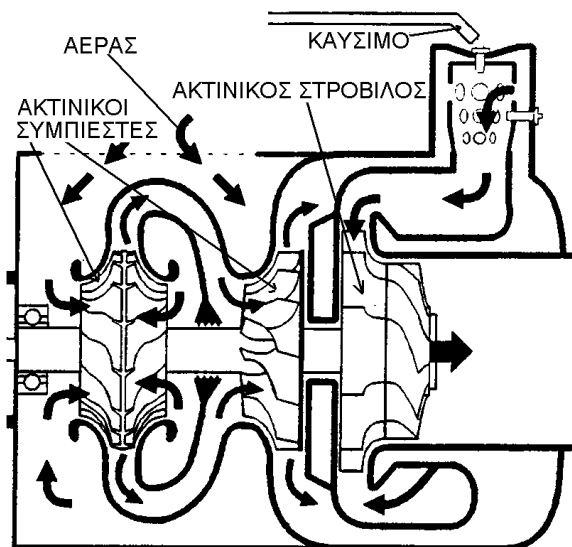
Υπάρχει όμως περίπτωση ένας και μόνο στρόβιλος να οδηγεί το συμπιεστή και το εξωτερικό φορτίο , δηλαδή να είναι ταυτόχρονα compressor και power turbine. Η διάμετρος των στροβίλων αυξάνεται κατά την κατεύθυνση της ροής των καυσαερίων καθώς αυξάνεται ο όγκος τους , ενώ μειώνεται η ταχύτητα και η πίεση τους. Επειδή ο στρόβιλος συνήθως συνδέεται με το συμπιεστή με κοινό άξονα , επιβάλλεται να ρυθμιστούν κατάλληλα οι συνθήκες λειτουργίας του συμπιεστή και του στροβίλου , ώστε να λειτουργούν αποδοτικά στην ίδια περιστροφική ταχύτητα .

Οι στρόβιλοι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ακτινικής ροής
- Αξονικής ροής

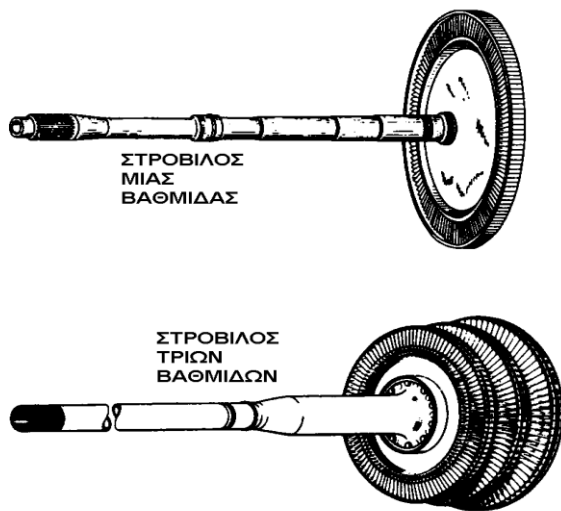
Οι στρόβιλοι ακτινικής ροής έχουν συνήθως ροή διευθυνόμενη προς τα μέσα και σπανιότερα προς τα έξω, ενώ οι αξονικής ροής χαρακτηρίζονται ως δράσεως ή αντιδράσεως ανάλογα δηλαδή από το ποσοστό ενεργείας ανά βαθμίδα που αποδίδεται στα κινητά πτερύγια.

Η χρήση στροβίλων ακτινικής ροής έχει περιορισθεί σήμερα μόνο σε βοηθητικές χρήσεις μικρής ιπποδυνάμεως. Οι στρόβιλοι αυτοί είναι κατασκευαστικά παρόμοιοι προς τους φυγόκεντρους συμπιεστές, ενώ τα καυσαέρια εκτονώνονται κατά την έννοια της ακτίνας προς τα μέσα, προς το μέρος του άξονα



Σχήμα 19. Ακτινικός στρόβιλος

Οι στρόβιλοι αξονικής ροής, εξεταζόμενοι από καθαρά σχεδιαστική πλευρά διακρίνονται σε υψηλής ενέργειας βαθμίδα και χαμηλής ενέργειας βαθμίδα. Οι υψηλής ενέργειας στρόβιλοι αξιοποιούν την διατιθέμενη ενέργεια των καυσαερίων σε πολύ λίγες βαθμίδες υψηλής ταχύτητας, με αποτέλεσμα μεγάλη θερμική πτώση ανά βαθμίδα και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι δεύτεροι έχουν περισσότερες βαθμίδες χαμηλότερης ταχύτητας, μικρότερης θερμικής πτώσεως ανά βαθμίδα και υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας.



Σχήμα 20. Στρόβιλος αξονικής ροής

Ο στρόβιλος λειτουργεί κάτω από ακραίες συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και μεγάλων στρεπτικών και φυγοκεντρικών δυνάμεων . Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων του στρόβιλου είναι σιδηρούχα ή ωστενιτικά κράματα , με βάση το νικέλιο ή το τιτάνιο , ενώ εφαρμόζονται και πυρίμαχες επιστρώσεις από σύγχρονα κεραμικά υλικά όπως το νιτρίδιο και το καρβίδιο του πυριτίου . Η σχεδίαση των πτερυγίων είναι πλήρους αεροδυναμική και είναι απόλυτα αναγκαία για τη διατήρηση ψηλού βαθμού απόδοσης.

Τα συνηθέστερα είδη απωλειών, των οποίων επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση με κατάλληλη σχεδίαση του στροβίλου είναι:

1. Απώλειες τριβής μεταξύ του θερμοδυναμικού μέσου και των επιφανειών διελεύσεως του.
2. Απώλειες λόγω αποχωρισμού της ροής ή λόγω δημιουργίας άλλων αεροδυναμικών φαινομένων, όπως στροβιλισμοί
3. Απώλειες λόγω διαρροών, κυρίως στα σημεία στεγανότητας προφυσίων
4. Απώλειες λόγω υψηλών ταχυτήτων του θερμοδυναμικού μέσου
5. Απώλειες λόγω ανομοιομορφίας της ενέργειας που διατίθενται σε περιπτώσεις μεγάλης περίσσειας αέρα ή ανομοιόμορφης καύσεως.

Τέλος οι τάσεις λειτουργίας του στροβίλου υπολογίζονται για τις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

1. Ταχύτητα που αντιστοιχεί στο 110% της μέγιστης επιτρεπόμενης, με συνθήκες θερμοκρασίας η οποία αντιστοιχεί σε πλήρες φορτίο.
2. Θερμοκρασία λειτουργίας 15% μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί σε πλήρη φορτίο και μέγιστη ταχύτητα.

Επειδή οι τάσεις λειτουργίας πρέπει οπωσδήποτε να διατηρούνται μικρότερες από ένα επιτρεπόμενο όριο που προσδιορίζεται από τα διατιθέμενα υλικά κατασκευής και το συντελεστή ασφαλείας, επιβάλλεται προσεκτική σχεδίαση του στροβίλου, ώστε οι τάσεις λειτουργίας να παραμένουν στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο.



## Συμπιεστής

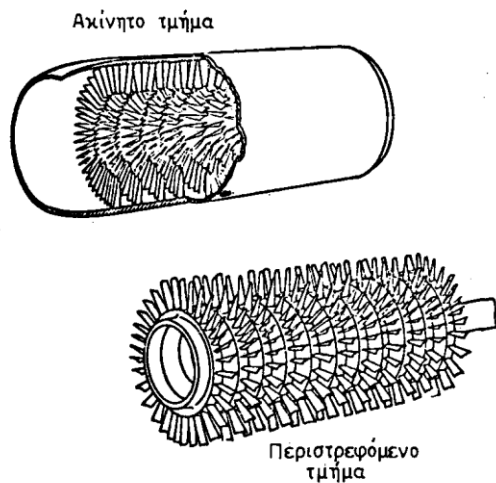
Μετά την εισαγωγή χωροταξικά τοποθετείται ο συμπιεστής που υλοποιεί τη θερμοδυναμική διεργασία της ισεντροπικής ( ιδανικά ) συμπίεσης , έπειτα ο θάλαμος καύσης και ακολουθεί ο στρόβιλος και η εξαγωγή .Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος έχουν παρόμοια δομή . Τα δύο αυτά συστήματα απαρτίζονται από ένα αριθμό βαθμίδων . Συγκεκριμένα κάθε βαθμίδα αποτελείται από μια σειρά περιστρεφόμενων πτερυγίων ( rotor blades ) ακολουθούμενη από μια αντίστοιχη σειρά ακίνητων πτερυγίων ( stator vanes ) . Τα ακίνητα πτερύγια προσδένονται περιφερειακά στην εσωτερική επιφάνεια του περιβλήματος και αποτελούν τον ονομαζόμενο στάτορα του συμπιεστή ενώ τα περιστρεφόμενα προσδένονται στους δίσκους και αποτελούν το στροφείο. Στους συμπιεστές , η κάθε βαθμίδα ανεβάζει την πίεση του αέρα περίπου κατά 30 % , ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασία του αυξάνεται κατά περίπου 30 βαθμούς Κελσίου , εξαιτίας της πρόσδοσης ενέργειας από τα πτερύγια της βαθμίδας . Ο ρόλος των ακίνητων πτερυγίων περιορίζεται μόνο στην αλλαγή της κατεύθυνσης ροής του αέρα έτσι ώστε να οδηγηθεί με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης στην επόμενη βαθμίδα . Οι αξονικές ταχύτητες του αέρα κατά τη συμπίεση φτάνουν τα 150 με 200 m/s , ενώ παροχή τα 500 Kg/s .Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων του συμπιεστή , είναι σφυρήλατα κράματα αλουμινίου , μαγνησίου και τιτανίου , ενώ του περιβλήματος κράμα αλουμινίου ή χάλυβας .

Όπως αναφέρθηκε η κύρια λειτουργία του συμπιεστή είναι να συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα ώστε κατά την έξοδο του να αποκτήσει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα . Με τον τρόπο αυτό , η παραγόμενη ώση θα είναι μεγάλη αφού ο κινητήρας θα μπορεί να χειρίζεται πάρα πολύ μεγάλες ποσότητες αέρα σε σύγκριση με το μικρό του όγκο. Οι τύποι συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους μικροστροβίλους είναι:

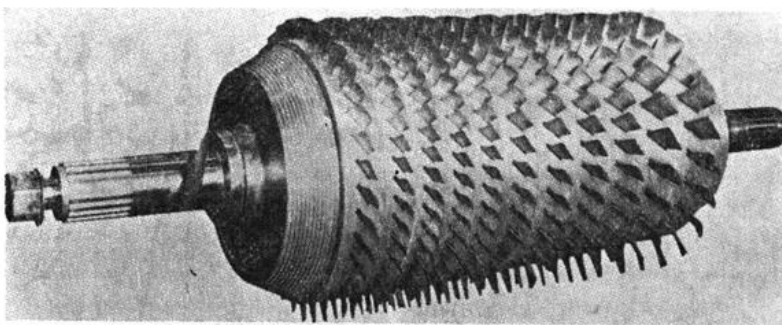
- α) Αξονικής Ροής
- β) Φυγοκεντρικής Ροής
- γ) Αξονικής και φυγοκεντρικής ροής

Ο κάθε τύπος λαμβάνει το όνομα του σύμφωνα με τη διεύθυνση ροής του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή . Ο τελευταίος τύπος αποτελεί συνδυασμό των άλλων δυο τύπων και φυσικά συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τους .

Στους συμπιεστές αξονικής ροής, όπως φανερώνει και η ονομασία τους, το ρευστό κινείται κατά τον άξονα της μηχανής στην περιοχή του χώρου που καταλαμβάνουν τα κινητά πτερύγια, δηλαδή μεταξύ κινητού και ακίνητου μέρους. Η διαδρομή της ροής αποτελείται από αριθμό βαθμίδων δηλαδή σειρές από κινητά και ακίνητα πτερύγια. Η κάθε βαθμίδα αυξάνει διαδοχικά την πίεση και τη θερμοκρασία του διερχόμενου αέρα. Εκτός από τις βαθμίδες, η διαδρομή των αερίων περιλαμβάνει και τη δίοδο τους μέσω οδηγητικών ακίνητων πτερυγίων, κυρίως πριν την είσοδο και μετά από την έξοδο από τις βαθμίδες. Ο αριθμός των βαθμίδων συνήθως είναι μεγαλύτερος από έξι και μικρότερος από είκοσι, πράγμα που εξαρτάται από τον επιθυμητό λόγο πιέσεων και την αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων. Ο αξονικός συμπιεστής αποδίδει σε φάσμα στροφών 10.000-30.000 στροφές ανά λεπτό.



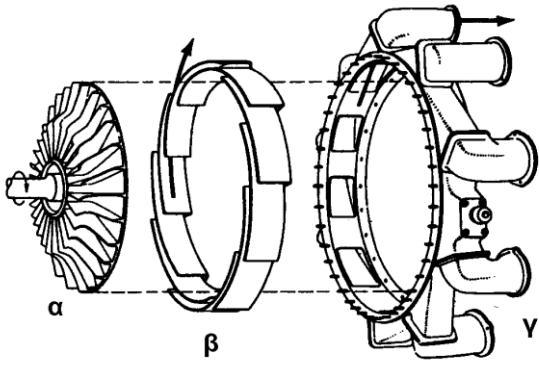
Σχήμα 21. Συμπιεστής αξονικής ροής



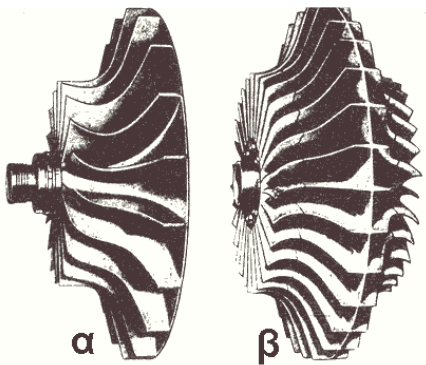
Σχήμα 22. Συμπιεστής αξονικής ροής

Φυγοκεντρικοί ονομάζονται οι συμπιεστές στους οποίους το ρευστό αποχωρίζεται από το συνεργαζόμενο τροχό κατά τη ακτινική διεύθυνση. οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές είναι σχετικά απλής κατασκευής και συναντώνται κυρίως σε μικρότερες μηχανές και εγκαταστάσεις, όπου η πολυπλοκότητα των συμπιεστών αξονικής ροής δεν δικαιολογείται. Αποτελούνται από ένα στροφείο ένα διαχύτη και ένα συλλέκτη. Το στροφείο κινείται με τη βοήθεια άξονα μέσα σε κέλυφος, στην είσοδο του οποίου δημιουργείται η αναρρόφηση του αέρα κατά την αξονική διεύθυνση. Με την περιστροφή αναρροφάται αέρας και μέσω των πτερυγιακών αυλάκων , κατά την έννοια της ακτίνας, καταθλίβεται προς την περιφέρεια. Εκεί, από το διαχύτη επιβραδύνεται η υψηλή ακτινική ταχύτητα που έχει αποκτηθεί και μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε ενέργεια πίεσης. Ο κατατριβόμενος αέρας συγκεντρώνεται στο συλλέκτη που ακολουθεί και οδηγείται στο χώρο καύσης ή σε υπάρχουσα άλλη βαθμίδα.

Ο φυγοκεντρικός αποτελείται από μία ή δυο βαθμίδες το πολύ , αποδίδει σε φάσμα περιστροφών 20.000 -50.000 στροφές ανά λεπτό , είναι απλός , ελαφρύς συμπαγής και άρα ανθεκτικός σε περίπτωση αναρρόφησης ξένων σωμάτων , φθηνός στην κτήση του και εύκολος στη εκκίνηση του. Η κάθε βαθμίδα του φυγοκεντρικού συμπιεστή παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό λόγο πίεσης ( 4:1 ή 5:1 ) σε σύγκριση με την αντίστοιχη βαθμίδα του αξονικού συμπιεστή. Όμως η προσθήκη περισσότερων των δυο βαθμίδων κρίνεται ασύμφορη λόγω των εκθετικά αυξανόμενων απωλειών ενέργειας ροής εξαιτίας της μεγάλης μεταβολής της κατεύθυνσης της ροής του αέρα . Έτσι επιτυγχάνεται τελικά σχετικά μικρός λόγος πίεσης εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού βαθμίδων συμπίεσης ( ολικός λόγος πίεσης 10:1) . Το μεγάλο του πλεονέκτημα είναι η συμπαγής και στιβαρή του κατασκευή . Από την άλλη μεριά παρουσιάζει σχετικά μεγάλη μετωπική επιφάνεια ενώ κρίνεται κατάλληλος για υψηλές συμπίεσεις μεγάλων παροχών αέρα .



Σχήμα 23. Μέρη φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) στροφείο, β) διαχύτης γ) πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής



Σχήμα 24. Στροφείο φυγοκεντρικού συμπιεστή α) απλής και β) διπλής εισόδου

## Θάλαμος Καύσης

Η σχεδίαση των θαλάμων καύσεως είναι συνήθως αποτέλεσμα βελτίωσης κάποιου προηγούμενου θαλάμου που αποδείχθηκε επιτυχής, έτσι σε συνδυασμό με τις νεώτερες επιτεύξεις της εφαρμοσμένης τεχνικής αποτελεί προϊόν εμπειρίας και επιστήμης. Για το λόγο αυτό υπάρχουν πολλά είδη θαλάμων καύσεως ανάλογα με τον κατασκευαστή τους τα οποία διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Ο θάλαμος καύσης λειτουργεί σε συνθήκες πολύ φτωχού μίγματος, δηλαδή με σημαντική περίσσεια αέρα. Για να συμβεί ανάφλεξη και να διατηρηθεί η καύση πρέπει τοπικά ο λόγος παροχής μάζας αέρα / καύσιμο, να κυμαίνεται από 8 : 1 έως 30 : 1. Στην περίπτωση όπου το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι η κηροζίνη τότε η στοιχειομετρική αναλογία απαιτεί λόγο αέρα / καυσίμου 15 : 1, δηλαδή ίδιο περίπου λόγο όπως εάν χρησιμοποιούσαμε βενζίνη. Όταν αναφερόμαστε συνολικά στο θάλαμο καύσης, παρατηρούμε ότι αυτός λειτουργεί με λόγο αέρα/καυσίμου που κυμαίνεται από 50:1 έως 70:1 ή και μεγαλύτερο. Η ταχύτητα εισόδου του αέρα στο θάλαμο καύσης είναι της τάξης των 150 με 200 m/s. Εάν επιδιωχθεί καύση σε τέτοια ταχύτητα τότε η απώλεια πίεσης στο θάλαμο καύσης θα είναι αρκετά υψηλή.

Για να σταθεροποιηθεί η φλόγα, η ροή του αέρα από το συμπιεστή διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα στο θάλαμο καύσης :

Το πρώτο, που αποκαλείται πρωτογενές ( primary ), αφού επιβραδυνθεί στο διαχύτη και στροβιλιστεί, εισέρχεται στο κύριο μέρος του θαλάμου καύσης όπου αναμιγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται. Ο θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εκεί φθάνουν τους 2.300 K. Το υπόλοιπο, το δευτερογενές ( secondary ), εισέρχεται σταδιακά στο θάλαμο μέσα από ειδικές οπές που υπάρχουν στο περίβλημα. Το ρεύμα αυτό λειτουργεί πολλαπλά, σε πρώτο στάδιο λειτουργεί σαν εμπόδιο για τα καυσαέρια. Η ροή αυτών των καυσαερίων αναγκαστικά ανακυκλώνεται έτσι ώστε να γυρνάει μέρος αυτών προς τα πίσω και να θερμαίνει το πρωτογενές μίγμα και έτσι να διατηρείται η καύση σταθερή. Σε τρίτο στάδιο εισέρχεται στο θάλαμο και μειώνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων σε επίπεδα επιτρεπτά από πλευράς αντοχής των υλικών κατασκευής των πτερυγίων στροβίλου. Ο θάλαμος καύσης είναι συνεχούς λειτουργίας, δηλαδή οι σπινθηριστές χρησιμοποιούνται για έναυση μόνο στην αρχή και μετά αποσύρονται, ενώ η καύση διατηρείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην πρωτεύουσα ζώνη και της συνεχούς ροής αέρα και καυσίμου. Η διεργασία της καύσης είναι σχεδόν ισοβαρής ( σταθερής πίεσης ).

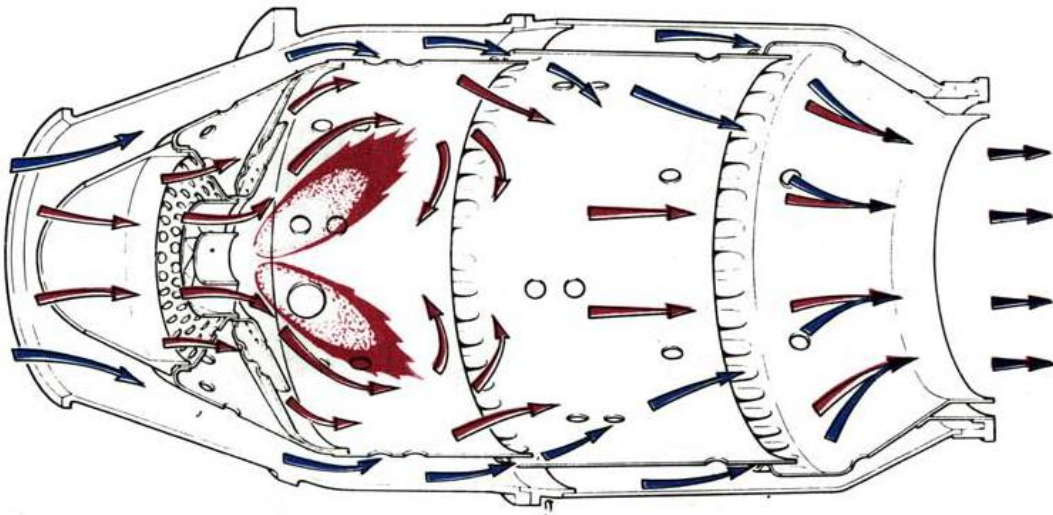
Όλοι οι θάλαμοι καύσεως διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- α) Σε αυτούς που είναι σχετικά απομακρυσμένοι από το συμπιεστή και το στρόβιλο και αποτελούν ξεχωριστή μονάδα και
- β) σε αυτούς που μαζί με το στρόβιλο και το συμπιεστή αποτελούν μια ενιαία κατασκευή.

Στη πρώτη κατηγορία οι θάλαμοι αποτελούνται από ένα δοχείο πίεσης επενδυμένο εσωτερικά με ένα ή περισσότερα χιτώνια για προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες και τα προϊόντα της καύσης. Πολλές φορές μέσα στο ίδιο δοχείο πίεσης βρίσκονται πολλοί μικρότεροι θάλαμοι καύσης διατεταγμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής και ομοιόμορφη ροή καυσαερίων προς το στρόβιλο.

Στη δεύτερη κατηγορία ο θάλαμος καύσης είναι ενσωματωμένος με το στρόβιλο και το συμπιεστή και αποτελούν μαζί μια ενιαία κατασκευή. Αυτό το είδος χρησιμοποιείται σε σύγχρονους αεριοστρόβιλους, η τάση των σύγχρονων κατασκευαστών έχει δείξει σαφής προτίμηση προς τους ενιαίους θαλάμους. Η κατηγορία αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τρία βασικά είδη θαλάμων :

- α) Πολλαπλοί ξεχωριστοί θάλαμοι μορφής σωλήνα
- β) Ενιαίος θάλαμος μορφής περιφερειακού δακτυλίου
- γ) Θάλαμοι καύσεως που είναι συνδυασμός των δύο παραπάνω



Σχήμα 25. Η ροή αέρα και καυσαερίων στο θάλαμο καύσης

## Πολλαπλοί ξεχωριστοί θάλαμοι μορφής σωλήνα

Οι θάλαμοι αυτοί, λέγονται θάλαμοι μορφής δοχείου (can type). Έτσι, ο αέρας μετά το συμπιεστή οδηγείται σε ατομικούς θαλάμους καύσης υπό μορφή κυλινδρικών δοχείων σωλήνων διαταγμένων στην εξωτερική περιφέρεια της μηχανής. Κάθε θάλαμος καύση χει ιδιαίτερο καυστήρα στο κέντρο του θαλάμου.

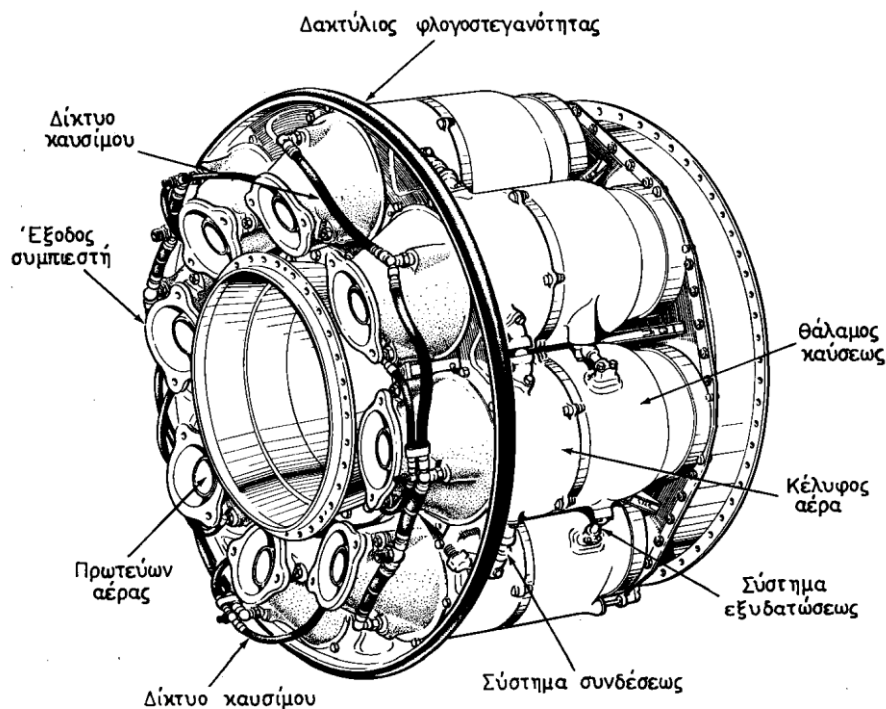
Ο αέρας μετά το συμπιεστή αναμιγνύεται με το καύσιμο και συντηρεί την καύση, επιπλέον αναμιγνύεται με τα προϊόντα της καύσης τα αραιώνει και κατεβάζει τη θερμοκρασία τους. Τα καυσαέρια αυτά οδεύουν προς το στρόβιλο. Τα πλεονεκτήματα του θαλάμου καύσης αυτού του τύπου είναι:

1) Λόγω της μικρής του διαμέτρου δεν απαιτείται σοβαρή ενίσχυση της κατασκευής με αποτέλεσμα να έχει χαμηλό βάρος.

2) Η συντήρηση είναι ευκολότερη, η εξόρμηση του θαλάμου καύσης από την υπόλοιπη μηχανή δεν είναι χρονοβόρα. Τα μειονεκτήματα αντίστοιχα είναι:

1) Λόγω της μικρής διαμέτρου των σωλήνων για την εξασφάλιση του απαιτούμενου χώρου καύσης, αυξάνει το μήκος τους με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το μήκος ολόκληρης της μηχανής.

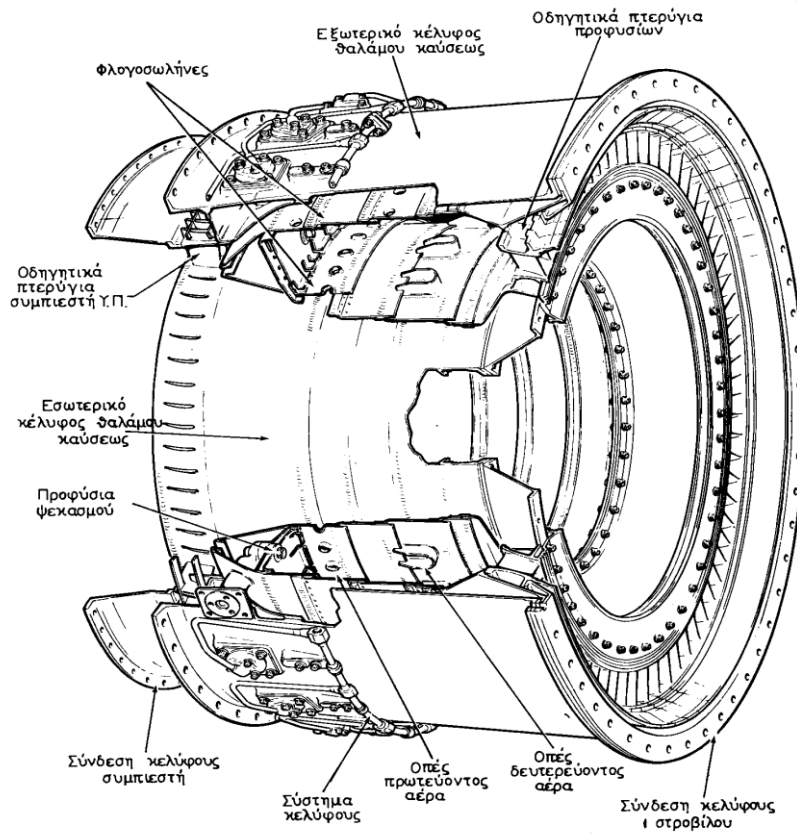
2) Τυχόν κακή λειτουργία ενός καυστήρα δημιουργεί αυξημένη τοπική υπερθέρμανση.



Σχήμα 26. σύστημα καύσης πολλαπλών θαλάμων

β) Ενιαίος θάλαμος καύσης περιφερειακού δακτυλίου.

Οι θάλαμοι του είδους αυτού αποτελούνται από ένα δακτυλιοειδή χώρο που περιβάλλει τη μηχανή.

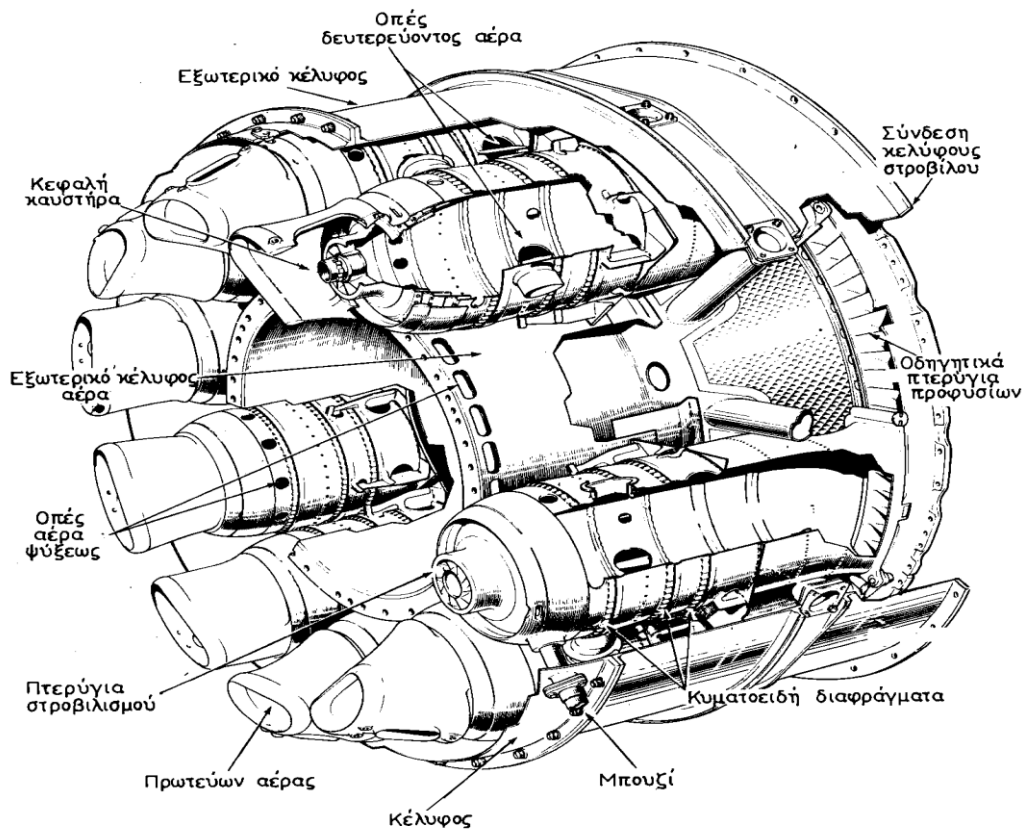


Σχήμα 27. θάλαμος καύσης μορφής περιφερειακού δακτυλίου



γ) Θάλαμοι καύσης συνδυασμού ( canannular type).

Από το συνδυασμό των προηγούμενων τύπων προκύπτει ένα νέο είδος θαλάμου καύσης. Αυτός αποτελείται από ιδιαίτερους κυλινδροειδείς θαλάμους τοποθετημένους σε επαφή μεταξύ τους μέσα σε κοινό δακτυλιοειδές κέλυφος. Κάθε κυλινδροειδής θάλαμος έχει ένα ομόκεντρο σωλήνα ο οποίος επιτρέπει αύξηση της αναμιγνυόμενης ποσότητας καυσίμου αέρα, χωρίς υπερβολική αύξηση των διαστάσεων του θαλάμου. Οι θάλαμοι συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς σωλήνες αγωγούς, μέσω των οποίων μεταδίδεται η φλόγα από θάλαμο σε θάλαμο μετά την αρχική έναυση.



Σχήμα 28. θάλαμος καύσης συνδυασμένου τύπου

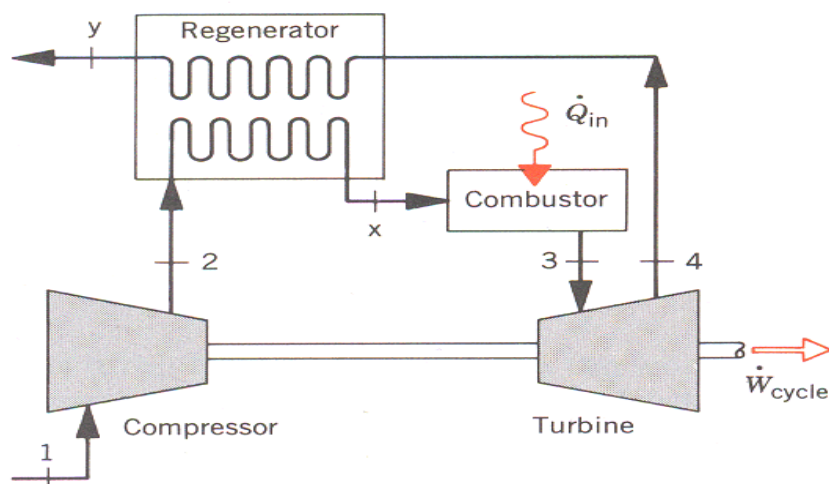
## Εναλλάκτες Θερμότητας

Υπάρχει δυνατότητα αύξησης της απόδοσης του στροβίλου, εάν μέρος της θερμότητας των καυσαερίων που εξέρχονται από το στρόβιλο επαναχρησιμοποιηθούν, αντί να απορρίπτονται στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός συλλέκτη ή εναλλάκτη θερμότητας. Οι εναλλάκτες αυτοί χρησιμοποιούν τα καυσαέρια της τουρμπίνας για την αύξηση της θερμοκρασίας των σωληνώσεων που μεταφέρουν τον πεπιεσμένο αέρα ,προς το θάλαμο καύσης , με συνέπεια αυτός να εισέρχεται στον καυστήρα προθερμασμένος, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου . Συνήθως ο βαθμός απόδοσης των εναλλακτών που χρησιμοποιούν οι αεριοστρόβιλοι θεωρείται ότι παίρνει τιμές από 0.7 έως 0.9 , ανάλογα με τον τύπο και τη φάση των κυκλοφορούντων ρευστών , ενώ η τεχνολογία των υλικών τους επιτρέπει μέγιστη τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας μέχρι 950 K .

Ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας του μικροστρόβιλου. Ωστόσο, δεδομένου ότι υπάρχει αυξημένη πτώση της πίεσης των καυσαερίων η ισχύς εξόδου μειώνεται συνήθως 10 με 15% από την εν λόγω εφικτή χωρίς εναλλάκτη . Με τη χρήση εναλλάκτη η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται και η αποτελεσματικότητα του μικροστρόβιλου σε εφαρμογές συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ ).

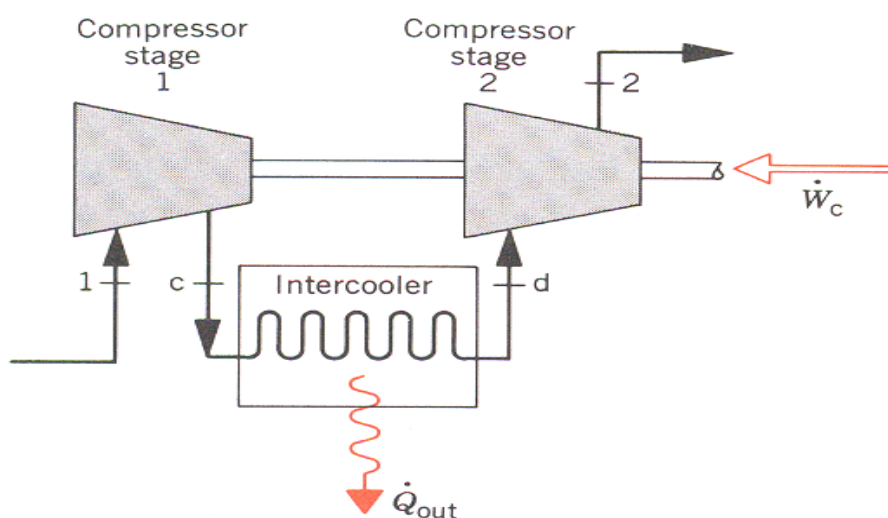
Με τη χρήση θερμικών εναλλακτών σε μικροστρόβιλους διακρίνουμε τους παρακάτω τρεις τύπους:

α) Μικροστρόβιλος με προθέρμανση : Ένας εναλλάκτης τοποθετημένος ανάμεσα στο συμπιεστή και στον θάλαμο καύσης , χρησιμοποιείται για να προθερμάνει το συμπιεσμένο αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης , εκμεταλλευόμενος τη θερμότητα των καυσαερίων ή τη θερμότητα που προέρχεται από μία επιπλέον καύση, που πραγματοποιείται σε έναν εξωτερικό λέβητα .



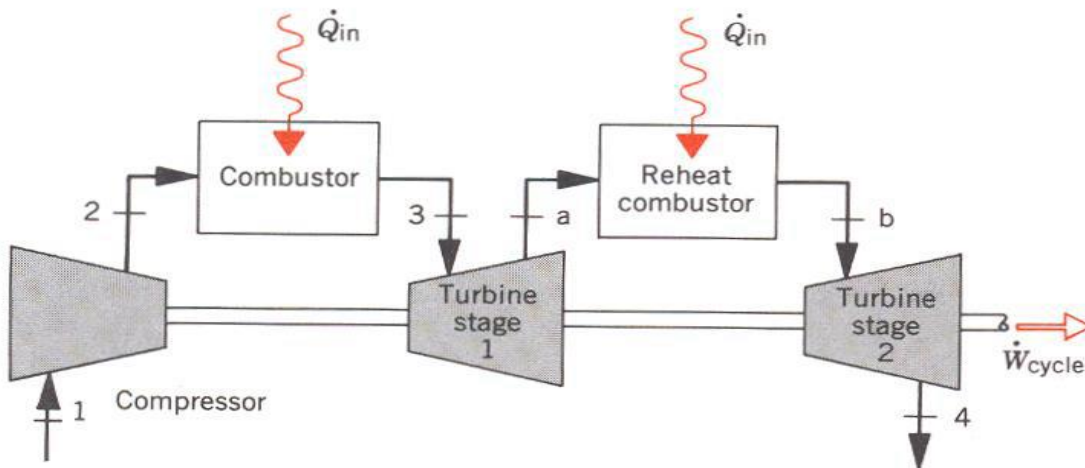
Σχήμα 29. Μικροστρόβιλος με προθέρμανση

β) Μικροστρόβιλος με ενδιάμεση ψύξη ( Intercooler ) : Η ενδιάμεση ψύξη σε συνδυασμό με αναγεννητήρες αυξάνει όπως είναι γνωστό το θερμικό βαθμό αποδόσεως του κύκλου, συγχρόνως όμως καθιστά την εγκατάσταση πολύπλοκη και απαιτεί πολύ διαθέσιμο όγκο. Ένας εναλλάκτης συνήθως τύπου αέρα-νερό , τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο συμπιεστές ή ανάμεσα σε δυο τύμπανα του ίδιου συμπιεστή , χρησιμοποιείται για να ψύξει το συμπιεσμένο αέρα προτού αυτός συμπιεστεί ξανά για να φτάσει στην τελική ολική τιμή του λόγου πίεσης .



Σχήμα 30. Μικροστρόβιλος με Intercooler

γ) Μικροστρόβιλος με αναθέρμανση ή μετάκαυση. Σε αυτή την περίπτωση πριν τον τελευταίο στρόβιλο υπάρχει ένας επιπλέον θάλαμος καύσης που ανεβάζει πάλι τη θερμοκρασία των καυσαερίων . Στις αεροπορικές εφαρμογές στροβίλων εκχύεται επιπλέον καύσιμο στον αγωγό εξαγωγής προκαλώντας με τον τρόπο αυτό και πάλι εξίσου αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων προτού αυτά εγκαταλείψουν το ακροφύσιο της εξαγωγής .



Σχήμα 31. Μικροστρόβιλος με αναθέρμανση

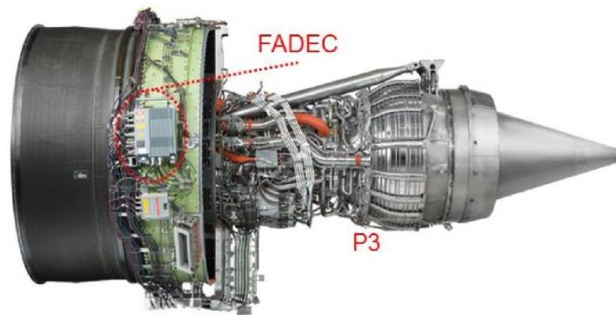
## Σύστημα έλεγχου (FADEC)

Η ελεγχόμενη ποσότητα καυσίμου η οποία καίγεται στον θάλαμο καύσης έχει ως αποτέλεσμα την ελεγχόμενη ισχύς εξόδου του αεριοστρόβιλου . Περίσσεια ή ανεξέλεγκτη προσθήκη καυσίμου συνεπάγεται την υπερθέρμανση και την υπέρβαση του ορίου ταχύτητας περιστροφής του στρόβιλου προκαλώντας σοβαρά προβλήματα στον κινητήρα . Τα συστήματα έλεγχου του κινητήρα χρησιμοποιούνται για να διατηρούν την λειτουργία του κινητήρα εντός των προβλεπόμενων κατασκευαστικών ορίων και ταυτόχρονα να διατηρούνται στο βέλτιστο δυνατό επίπεδο οι επιδόσεις του. Ιδιαίτερα εξελιγμένα συστήματα έλεγχου όπως το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και έλεγχου του κινητήρα , ( Full Authority Digital Engine Control, FADEC ) , χρησιμοποιούνται ευρέως από τους περισσότερους μοντέρνους κινητήρες. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη σχετικά με την κατάσταση και απόδοση του κινητήρα είναι οι εξής:

- ροή μάζας αέρος διαμέσου του κινητήρα
- στροφές και θερμοκρασία εισόδου τουρμπίνας
- ώση σε σχέση με τη ροή καυσίμου
- πίεση και θερμοκρασία λαδιού
- στροφές συμπιεστή
- λόγος συμπίεσης
- κραδασμοί

Σε ένα σύγχρονο σύστημα FADEC τα παραπάνω μεγέθη μετρώνται συνεχώς και οι διακυμάνσεις τους αποθηκεύονται ώστε να βοηθήσουν αποτελεσματικά στην αξιοπιστία και τη συντήρηση του κινητήρα. Οι μετρήσεις αυτών των παραμέτρων αποθηκεύονται για την ορθή αξιολόγηση και η επισταμένη μελέτη που βοηθά ουσιαστικά στην επισκευή ζημιών, αλλά και οπωσδήποτε στην πρόληψη.

Επίσης οι σύγχρονοι κινητήρες διαθέτουν πλέον συστήματα ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων , ( Dry Low Emissions gas turbines , DLE ) . Στους κινητήρες αυτούς σήματα από επιπλέον αισθητήρες επεξεργάζονται `ώστε να ρυθμίζεται ο λόγος αέρα καυσίμου που διατηρεί τους εκπεμπόμενους ρύπους NOx , CO και UHC εντός των καθορισμένων ορίων .



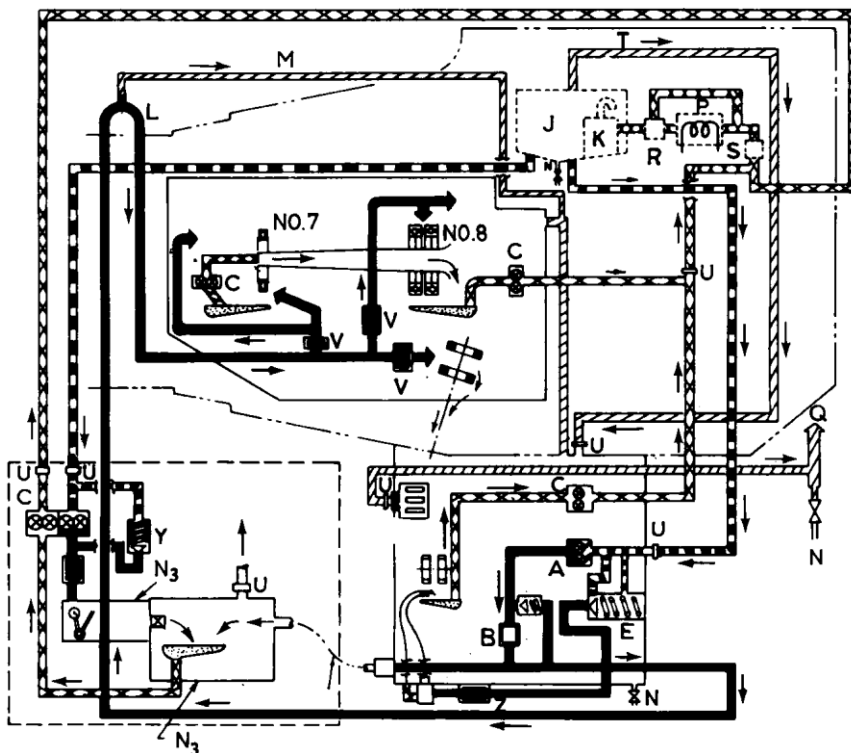
Σχήμα 32. σύστημα ελέγχου αεριοστρόβιλου FADEC

## Βοηθητικά συστήματα Μικροστροβίλου

Οι αεριοστροβίλοι όπως όλες οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν ένα πλήρες και ενιαίο σύνολο, στο οποίο τα βοηθητικά συστήματα περιλαμβάνονται επάνω στη μηχανή. Πέρα από τα παραπάνω κύρια εξαρτήματα και συστήματα ελέγχου, ο αεριοστροβίλος έχει και βοηθητικά συστήματα όπως το σύστημα παροχής, λίπανσης, υδραυλικών, γεννήτρια, πυρόσβεση, αποπαγοποίηση και κλιματιστικού αν πρόκειται για κινητήρα αεροσκάφους. Η ισχύς για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων προέρχεται από τον στρόβιλο του συμπιεστή ή από τον συμπιεσμένο αέρα που απομαστεύεται από τις τελευταίες βαθμίδες του συμπιεστή.

### Σύστημα λίπανσης

Το σύστημα λίπανσης παρέχει λάδι υπό πίεση στους τριβείς της μηχανής, ενώ συγχρόνως φιλτράρει και ψύχει το λάδι, ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση των ιδιοτήτων του σε επιθυμητά επίπεδα. Ορισμένα στοιχεία του συστήματος όπως οι αντλίες αποτελούν τμήμα της μηχανής, από την οποία και παίρνουν κίνηση ενώ άλλα στοιχεία του συστήματος όπως οι δεξαμενές και τα ψυγεία είναι σχετικά απομακρυσμένα.



Σχήμα 33. σχέδιο συστήματος λίπανσης αεριοστροβίλου

## Πυροπροστασία

Η πυροπροστασία αποτελεί αναγκαίο σύστημα στις εγκαταστάσεις αεριοστροβίλων. Οι αεριοστροβίλοι έχουν εκτεθειμένες επιφάνειες με θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από τις θερμοκρασίες αυταναφλέξεως. Αυτό σε συνδυασμό με ότι τα δίκτυα καυσίμου αναγκαστικά περνούν από σημεία κοντά στις επιφάνειες αυτές καθιστούν πρακτικά αναπόφευκτη την εκδήλωση πυρκαγιάς σε περίπτωση διαρροής του δικτύου ή άλλης τυχαίας βλάβης.

Για την αντιμετώπιση του κινδύνου αυτού, λαμβάνονται προληπτικά μετράμε την παρεμβολή μονωτικών μεταξύ των δικτύων και των επιφανειών αλλά και κατασταλτικά μέτρα για την κατάσβεση της πυρκαγιάς όταν αυτή εκδηλωθεί. Έτσι χρησιμοποιούνται συστήματα όπου χρησιμοποιούνται όλα τα κατάλληλα μέσα που διατίθενται για το σκοπό αυτό όπως μείγμα αφρού, διοξείδιο του άνθρακα και άλλες χημικές ενώσεις όπως (υδρογονάνθρακες ,Halon ). Καθένα από τα μέσα αυτά παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το μείγμα αφρού έχουν ως κύριο συστατικό το νερό που διατίθενται σε αφθονία από το περιβάλλον , διαβρώνουν τις επιφάνειες και χρειάζεται πλήρης αποκατάσταση της μηχανής ( π.χ. πλύσιμο με πετρέλαιο) το συντομότερο δυνατό. Τα χημικής συνθέσεως πυροσβεστικά μέσα αν και δεν έχουν τέτοιο μειονέκτημα είναι ακριβά και τοξικά για το περιβάλλον. Ανεξάρτητα από το είδος πυρόσβεσης που θα χρησιμοποιηθεί, βασικό χαρακτηριστικό όλων είναι η άμεση διακοπή της παροχής καυσίμου και αέρα με τη ενεργοποίησή τους. Τέλος όλα τα συστήματα φέρουν στοιχεία έγκαιρου εντοπισμού εστίας φωτιάς τα οποία ενεργοποιούνται είτε με υπερβολική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας είτε από την παρουσία καπνού πράγμα που βοηθά τους χειριστές τόσο στον εντοπισμό όσο και στην έγκαιρη αντιμετώπιση του κινδύνου μόλις εκδηλωθεί.



## Συστήματα εκκινήσεως αεροστροβίλου

Όπως στα περισσότερα είδη μηχανών, έτσι και για τον αεροστρόβιλο χρησιμοποιείται εκκινητής, δηλαδή μια διάταξη η οποία χρησιμοποιεί εξωτερική ενέργεια και περιστρέφει τον κινητήρα μέχρι τέτοια ταχύτητα, ώστε να μπορεί από μόνος του πια να διατηρήσει την καύση και συνεπώς και τη λειτουργία του. Η βασική επομένως απαίτηση από τον εκκινητή είναι να παρέχει τη απαραίτητη για το σκοπό αυτό ροπή, καθώς επίσης και να μπορεί να περιστρέφει επί ορισμένο χρονικό διάστημα τον αεροστρόβιλο σαν κινητήρα, ώστε να επιτυγχάνεται η εξυδατωση πριν τη λειτουργία, η απόψυξη μετά τη λειτουργία και η πλύση του κατά τη συντήρηση. Συνήθως ο εκκινητής είναι είτε μικρός ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτούμενος από μπαταρία ή ρεύμα είτε μικρότερος αεροστρόβιλος ή DIESEL. Σημαντικό χαρακτηριστικό του εκκινητή είναι η συνολικά διατιθεμένη από αυτόν ενέργεια, η οποία καθορίζει το χρόνο κατά τον οποίο μπορεί συνεχώς να στρέψει τον αεροστρόβιλο καθώς και τη δυνατότητα επανειλημμένων εκκινήσεων του.



Photo: StarterGenerator.com®

Σχήμα 34: Εκκινητής - Γεννήτρια αεροστροβίλου

## Ηλεκτρικό δίκτυο μικροστροβίλου και σωληνώσεις καυσίμου και λιπαντικού

Τα δίκτυα του αεριοστροβίλου, τόσο τα ηλεκτρικά όσο και οι σωληνώσεις, διαφέρουν όχι μόνο μεταξύ των διαφόρων τύπων μηχανών, αλλά και για την ίδια μηχανή, ανάλογα με την εγκατάσταση στην οποία θα τοποθετηθεί.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα τροφοδοτούν με ρεύμα τους δείκτες λειτουργίας, ενεργοποιητές και το σύστημα έναυσης της μηχανής. Οι κυριότεροι δείκτες λειτουργίας που συναντάμε σε έναν μικροστροβίλο είναι :

1. Θερμοηλεκτρικά στοιχεία για τη μέτρηση των θερμοκρασιών εισόδου στο στρόβιλο ισχύος ( θερμοκρασία T2)
2. Θερμόμετρα με αντίσταση για μέτρηση της θερμοκρασίας λαδιού λίπανσης των τριβέων ( ρουλεμάν)
3. Δείκτες μετρήσεως ταλαντώσεων του κομπρέσορα και του στροβίλου ισχύος
4. Στροφόμετρα λειτουργίας του κομπρέσορα και του στροβίλου ισχύος
5. Δείκτης πληρότητας δεξαμενής καυσίμου
6. διακόπτης υπερταχύνσεως εκκινητή

Τέλος, σε ότι αφορά τις σωληνώσεις εκτός των δικτύων καυσίμου λαδιού πυροπροστασίας, ψύξεως κλπ) υπάρχουν και τα δίκτυα επιστροφών καυσίμου και λιπαντικού για τη αποφυγή απωλειών των ποσοτήτων λιπαντικού και καυσίμου που δεν έχουν καταναλωθεί.

## 2.5 Χαρακτηριστικά Απόδοσης Μικροστροβίλου

Οι μικροστρόβιλοι είναι πιο περίπλοκοι από ό,τι οι συμβατικοί αεριοστρόβιλοι απλού κύκλου, καθώς η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας μειώνει την κατανάλωση καυσίμου (έτσι έχουν σημαντική αύξηση της απόδοσης) και εισάγει επιπλέον εσωτερικές απώλειες πίεσης που μειώνουν την απόδοση και ισχύ. Δεδομένου ότι ο εναλλάκτης έχει τέσσερις συνδέσεις (για την απαλλαγή συμπιεστή, την απαλλαγή

τουρμπίνας επέκτασης, την είσοδο καυστήρα, και το σύστημα εξάτμισης) αυτό είναι μια πρόκληση για το σχεδιαστή να κάνει όλες τις συνδέσεις κατά τρόπο που ελαχιστοποιεί την απώλεια πίεσης, να κρατά το κόστος κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα αλλά παράλληλα να διατηρεί υψηλή την αξιοπιστία του συστήματος. Η προσθήκη εναλλάκτη θερμότητας επιβάλλει επιπλέον παραμέτρους κατά το σχεδιασμό ώστε να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους. Εναλλάκτης με μεγαλύτερη ικανότητα ανάκτησης απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια στην κατασκευή, η οποία αυξάνει τόσο το κόστος όσο και την πτώση πίεσης.

Αυτή η αυξημένη εσωτερική πτώση πίεσης μειώνει την καθαρή παραγωγή ενέργειας και συνεπώς αυξάνει το κόστος του μικροστρόβιλου ανά kW. Η επίδοση των μικροστροβίλων, από πλευράς τόσο αποτελεσματικότητας όσο και παραγόμενης ισχύος είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις μικρές διακυμάνσεις των εσωτερικών συνιστωσών (στοιχείων) αλλά και των εσωτερικών απωλειών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υψηλής αποδοτικότητας κύκλος ανάκτησης διεργασιών απαιτεί ένα πολύ μεγαλύτερο ποσό του αέρα και των προϊόντων καύσης ροή ανά kW ισχύος από ό,τι ισχύει για απλού κύκλου μηχανές. Όταν το καθαρό αποτέλεσμα είναι η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο μεγάλων αριθμών (ο συμπιεστής καθώς και επέκταση εργασιών στρόβιλο ανά μονάδα ροής μάζας), μικρές απώλειες σε συστατικό αποτελεσματικότητας, τα εσωτερικά απώλειες πίεσης και της αποτελεσματικότητας του εναλλάκτη έχουν μεγάλες επιπτώσεις επί της απόδοσης και της καθαρής ισχύος ανά μονάδα ροής μάζας.

## 2.6 Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά Μικροστροβίλων

1)Θερμική απόδοση: Οι μικροστρόβιλοι παράγουν θερμική έξοδο σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από για την ικανοποίηση μιας ποικιλίας της θερμικής αναγκών. Ποικιλία καυσίμων : Οι μικροστρόβιλοι μπορούν να λειτουργούν χρησιμοποιώντας διάφορα καύσιμα όπως το φυσικό αέριο και υγρά καύσιμα, όπως βενζίνη, κηροζίνη και ντίζελ / πετρέλαιο θέρμανσης.

2)Αξιοπιστία και διάρκεια ζωής : Ο χρόνος ζωής κυμαίνεται από 40.000 έως 80.000 ώρες. Ενώ οι μονάδες έχουν αποδεδειγμένη αξιοπιστία , δεν έχουν στο εμπόριο αρκετά χρόνια ώστε να δοθούν οριστικά δεδομένα χρόνου ζωής. Εύρος Ισχύος : Η παραγόμενη ισχύς των μικροστροβίλων ποικίλει από 30 έως 350 kW.

3)Εκπομπές: Οι χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου και ο υψηλός λόγος καυσίμου-αέρα έχουν ως αποτέλεσμα οι εκπομπές NOx να βρίσκονται σε τιμές κάτω των 10 μερών ανά εκατομμύριο (ppm) κατά την λειτουργία με φυσικό αέριο. Επεκτασιμότητα: Οι μονάδες μπορούν να συνδεθούν παράλληλα ώστε να εξυπηρετήσουν μεγαλύτερα φορτία και να παράσχουν ισχύ υψηλής αξιοπιστίας

4)Ηλεκτρική απόδοση :

Η αναφερόμενη απόδοση είναι η μεικτή έξοδος της γεννήτριας χωρίς να υπολογίζονται οι απώλειες μετατροπής. Συχνά αυτό γίνεται σε υψηλές συχνότητες, οπότε η παραγόμενη ισχύς πρέπει να διορθωθεί και να αναστραφεί στα 50 ή στα 60 Hz .Υψηλότεροι δείκτες πίεσης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το όριο του συμπιεστή και τις επιτρεπόμενες καταπονήσεις των στοιχείων του στροβίλου λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων αλλά και τα οικονομικά μεγέθη των υλικών , πρακτικά τα όρια αναλογίας πίεσης κυμαίνονται σε τιμές από 3.5 έως 5 . Πολύ χαμηλή εκπομπή καυσαερίων που περιέχουν λιγότερα από 9 εκατομμυριοστά οξείδια του νατρίου. Η ποικιλία πιθανών καυσίμων. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν απόβλητα πετρελαίου ή φυσικού αερίου σαν καύσιμο καταστρέφοντας ουσιαστικά αέριους ρύπους του θερμοκηπίου και τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές απομακρυσμένες όπου δεν υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο.

## 2.7 Τα οικονομικά στοιχεία μικροστρόβιλων

Λόγω της άρσης των περιορισμών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ιδιώτες διευκολύνει όλο και περισσότερους να εισέλθουν στην αγορά της ενέργειας είτε με μικρές μονάδες παραγωγής ισχύος είτε με μεγαλύτερες μονάδες για χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και θερμότητας είτε στην οικία τους είτε στην επιχείρησή τους. Λογά της νομοθεσίας και των επικείμενων αλλαγών και της νομοθεσίας οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ενέργειας καθυστερούν την ανάπτυξη νέων εγκαταστάσεων

Αυτό έχει δημιουργήσει μια έλλειψη παραγωγής στην ελεύθερη αγορά. Με αυτό τον τρόπο οδηγούμαστε στη χρήση μικρότερων και φθηνότερων μορφών ενέργειας που θα επιτρέψει στους μικρότερους πελάτες περισσότερο έλεγχο στον τρόπο και τους όρους με τους οποίους θα καλύπτονται οι ενεργειακές τους ανάγκες. Πολλές χώρες ερευνούν τις χρήσεις των μικροστρόβιλων . Στην πραγματικότητα , ο τρόπος που διαχειρίζεται κάθε χώρα τις διάφορες διαθέσιμες μορφές ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στο πόσο γρήγορα και εύκολα θα αφομοιώσουν τέτοιου είδους νέες τεχνολογίες. Για παράδειγμα το ηλεκτρικό δίκτυο των ΗΠΑ έχει δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχει ενέργεια από τις κεντρικές παραγωγικές εγκαταστάσεις σε όλη την έκταση της χώρας. Ενώ σε λιγότερο αναπτυγμένες χώρες που δεν έχουν αυτή την υποδομή, υπάρχει πιο πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη τέτοιου είδους τεχνολογίας. Η τεχνολογία των μικροτουρμπινών θα έχει μια τέλεια εφαρμογή σε χώρες που έχουν έτοιμα συστήματα διανομής φυσικού αερίου αλλά πολύ λίγες εγκαταστάσεις και περιορισμένης έκτασης δίκτυο όπως σε χώρες τις Αφρικής. Σε αυτές τις χώρες η τεχνολογία των μικροτουρμπινών θα έχει μια τέλεια εφαρμογή.



Σχήμα 35 : Μικροστρόβιλος οικιακής χρήσης

## 2.8 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Συστήματος Συμπαραγωγής Μικροστρόβιλου οικιακής χρήσης CAPSTONE C30

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αναφέρεται στη σωστή χρήση τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και της θερμικής ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής ενέργειας. Οι μικροστρόβιλοι μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν για να συλλάβουν τη θερμική ενέργεια που παράγεται από την εξάτμιση για να παρέχουν ένα σημαντικό οικονομικό πλεονέκτημα στους τελικούς χρήστες. Οι microturbines Capstone μπορούν να επιτύχουν συνολικά επίπεδα απόδοσης έως και 80 τοις εκατό σε εφαρμογές συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) και έως και 90 τοις εκατό σε εφαρμογές συνδυασμένης ψύξης, θερμότητας και ισχύος (CCHP).



Σχήμα 36. Μικροστρόβιλος CAPSTONE C30

Ο μικροστρόβιλος της CAPSTONE C30 μπορεί να προσφέρει στο δίκτυο μέχρι και 30 MW.

## ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ CAPSTONE C30

- Κατηγορία παραγόμενης ισχύος: 30 kw
- Συνδυασμένη απόδοση θερμότητας και ισχύος: Μέχρι 90%
- Τάση: 400-480 VAC
- Συχνότητα: 50/60 Hz, σύνδεση δικτύου 10-60 Hz,
- Ηλεκτρική υπηρεσία: 3-φάση, 4-καλώδιο
- Ηλεκτρική απόδοση LHV: 26.00%
- Πλάτος: 0,76 μ. (30 ίντσες)
- Βάθος: 1,5 μ. (60 ίντσες)
- Ύψος: 1.8 m (70 ίντσες)
- Βάρος: 405 kg (891 lbs); Διπλή λειτουργία - 578 kg (1,271 lbs)
- Καθαρός ρυθμός θερμότητας LHV: 13,8 MJ / kWh (13,100 BTU / kWh)
- Θερμοκρασία καυσαερίων: 275°C (530°F)
- Ροή καυσαερίων: 0,31 kg / s (0,68 lbm / s)
- Συμβατά καύσιμα: Φυσικό αέριο, Υγρά καύσιμα (Κηροζίνη, Καύσιμα αεροπορίας, Ντίζελ εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο )
- Ακουστικές εκπομπές σε πλήρη ισχύ στα 10 m (33 ft) 65 dBA

- 1) Ονομαστική απόδοση πλήρους ισχύος σε συνθήκες ISO: 59°F, 14.696 psi, 60% RH
- 2) Οι διαστάσεις ύψους είναι στην οροφή. Η έξοδος εξαγωγής μπορεί να εκτείνεται έως και 7 ίντσες πάνω από την οροφή.
- 3) Προδιαγραφές που βασίζονται σε συστήματα φυσικού αερίου υψηλής πίεσης. Οι τιμές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τους άλλους τύπους καυσίμων.



Σχήμα 37. Θάλαμος καύσης αεριοστροβίλου

Ο μικροστρόβιλος οικιακής χρήσης της CAPSTONE έχει εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων. Εφοδιάζεται με μόνο ένα κινητό μέρος έτσι χρειάζεται ελάχιστο χρόνο συντήρησης και διακοπής της λειτουργίας του. Τα ρουλεμάν λειτουργούν με αέρα χωρίς λιπαντικό λάδι ή ψυκτικό υγρό. Ο συμπαγής αρθρωτός σχεδιασμός επιτρέπει την εύκολη και χαμηλού κόστους εγκατάσταση του

Πολλαπλές μονάδες συνδυάζονται εύκολα λειτουργούν ως μοναδική πηγή παραγωγής. Απομακρυσμένες δυνατότητες παρακολούθησης λειτουργίας κατά τη χρήση του και διάγνωσης βλάβης. Τέλος είναι αποδεδειγμένη τεχνολογία με δεκάδες εκατομμύρια ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 38. Κινητό μέρος C30 συμπιεστής και στρόβιλος



### 3.ΚΑΥΣΙΜΑ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΩΝ

#### 3.1 Ευελιξία Καυσίμων μικροστροβίλων

Το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο στις μέρες μας βιώνει σημαντικές αλλαγές καθώς τα τρέχοντα οικονομικά θέματα εξελίσσονται.

Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας συνεχίζει να αναγκάζει κυβερνήσεις και τους παροχείς ενέργειας να αναζητήσουν εναλλακτικές λύσεις για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Για να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες ανάγκες, οι παροχείς αυτοί πρέπει να έρθουν αντιμέτωποι με σοβαρά ζητήματα όπως η παροχή και το κόστος των καυσίμων, αλλά και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Με περιορισμένες πηγές καυσίμων και αυξημένο το ζήτημα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η προσπάθεια εύρεσης καυσίμων με μεγαλύτερη απόδοση και χαμηλότερες εκπομπές μοιάζει πολύ λογική.

Τα συστήματα παραγωγής που στηρίζονται σε αεριοστρόβιλους προσφέρουν αποδοτικές λύσεις μετατροπής ενέργειας για την αντιμετώπιση του ζητήματος της ανάγκης χρήσης ποικίλων καυσίμων με ταυτόχρονη λειτουργία φιλική προς το περιβάλλον. Καθώς τα έθνη αναζητούν και αποσκοπούν στην εγχώρια ενεργειακή τους ασφάλεια, μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και μειωμένη επίδραση από το μεταβλητό κόστος των καυσίμων, έχουν προχωρήσει σε εξέταση εναλλακτικών ή ‘μη παραδοσιακών’ πηγών καυσίμων για μεγάλη παραγωγή ενέργειας .

Η Μέση Ανατολή σήμερα βιώνει στις μέρες μας οικονομική ανάπτυξη και αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση. Εκτός της ανάγκης για ικανοποίηση των αυξημένων αναγκών, τόσο του πληθυσμού όσο και της βιομηχανίας, η περιοχή βρίσκεται κάτω από συνεχή πίεση για να κάνει το πετρέλαιο και το αέριο άμεσα και περισσότερο διαθέσιμα για την υποστήριξη των παγκόσμιων αναγκών. Η προσπάθεια αυτή μοιάζει μονόδρομος και είναι καθοδηγούμενη από την έρευνα για υψηλότερη απόδοση και μικρότερο ποσοστό ρύπων στο πλαίσιο της ασφάλειας στις παροχές του αερίου. Με δεδομένο ότι οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (Natural Gas Combined Cycle – NGCC) παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση, θα υπάρξει αυξανόμενη ζήτηση για το φυσικό αέριο , η οποία θα δημιουργήσει πίεση για αυξανόμενη διαθεσιμότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου (Liquefied Natural Gas-LNG). Ταυτόχρονα, οι χώρες θα εξακολουθήσουν να αναζητούν διαθέσιμους φυσικούς πόρους, όπως υγρά καύσιμα και γαιάνθρακα, σαν τρόπο για να αυξηθεί η ενεργειακή σταθερότητα και η ασφάλεια. Οι αεριοστρόβιλοι -μικροστρόβιλοι -θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ως καύσιμο χρησιμοποιούνται εκτενώς σε όλη τη βιομηχανία των ΗΠΑ για να τροφοδοτούν τις βιομηχανικές διεργασίες. Η πλειοψηφία των στροβίλων λειτουργούν χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο λόγω της διαθεσιμότητας του, του φθηνού κόστους και της αξιοπιστίας. Ωστόσο, ένας συνδυασμός τελευταίων παραγόντων , όπως η μεταβλητότητα στην παροχή των καυσίμων και των τιμών, η παγκόσμια ανησυχία για τις εκπομπές άνθρακα και ο αυξημένος κίνδυνος της εξάρτησης από μία μόνο πηγή

ενέργειας, έχουν κάνει την ευκαιρία χρήσης υποκατάστατων του φυσικού αερίου , όπως βιομηχανικές, δημοτικές και γεωργικές πηγές ενέργειας, πολύ ελκυστική από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη.

### 3.2 Προδιαγραφές καυσίμου για μικροστροβίλους

Στα αέρια καύσιμα όπως το biogas και syngas οι ρυπαντές είναι ένα θέμα που χρειάζεται προσοχή, ιδιαίτερα τα όξινα συστατικά (  $H_2S$ , όξινα αλογόνα,  $HCN$ , αμμωνία, άλατα και συστατικά που περιέχουν μέταλλα, οργανικά αλογόνα, θειούχες νιτρικές ενώσεις και ενώσεις που περιέχουν πυρίτιο και λάδια). Κατά την καύση, τα αλογονούχα και θειούχα συστατικά σχηματίζουν οξυγονούχα οξέα καθώς και εκπομπές  $SO_2$ ,  $SO_3$  και  $H_2O_4$ . Τα οξέα διαβρώνουν μηχανικά εξαρτήματα και μικρά κλάσματα αζώτου οξειδώνονται κατά την καύση σχηματίζοντας  $NO_x$ . Τα στερεά συστατικά που περιέχονται στο αέριο πρέπει να κρατιούνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις έτσι ώστε να αποτρέπεται η διάβρωση του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Αν κάποιο από τα ανεπιθύμητα συστατικά ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια του κατασκευαστή επιβάλλεται η εφαρμογή μιας σειράς διαδικασιών καθαρισμού, διαχωρισμού και φιλτραρίσματος του αερίου καυσίμου. Μόνο μερικές κατασκευάστριες εταιρείες μικροστροβίλων έχουν συγκεκριμένα όρια για τις συγκεντρώσεις των συστατικών του αερίου καυσίμου που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στα συστήματά τους. Οι περισσότεροι κατασκευαστές μικροστροβίλων δεν είναι αυστηροί και ακριβείς στην ανακοίνωση των ορίων των συστατικών που περιέχονται στα αέρια καύσιμα που θα χρησιμοποιηθούν στα συστήματά τους για παράγωγή ισχύος. Αυτό είναι κάτι που στο μέλλον θα πρέπει να αλλάξει και τα όρια να γίνουν πιο συγκεκριμένα.

### 3.3.1 Κλασσικά Καύσιμα μικροστροβίλων

Στο σύγχρονο παγκόσμιο και μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για στροφή προς μη παραδοσιακά καύσιμα, αξιοποιώντας την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Ως μηχανές συνεχούς ροής με στιβαρή κατασκευή και καθολικά συστήματα καύσης, οι αεριοστροβίλοι έχουν εξελιχθεί και έχουν δυνατότητες να δέχονται μεγάλη ποικιλία καυσίμων. Υπάρχουν πολλά εναλλακτικά καύσιμα αλλά δεν είναι όλα εφαρμόσιμα σε κάθε περιοχή. Η ταξινόμηση των εναλλακτικών αυτών καυσίμων μπορεί να γίνει ως εξής :

- 1) Πετρέλαια, συμπεριλαμβανομένου και του φυσικού πετρελαίου και άλλων παραγώγων διύλισής του, τα οποία θερμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα για να αποκτήσουν το κατάλληλο ιξώδες για καύση σε αεριοστροβίλο.
- 2) Παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών – προερχόμενα από πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή τομείς του χάλυβα.
- 3) Συνθετικό αέριο (Syngas) και συνθετικά καύσιμα (Synfuels) – Μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, γαιάνθρακα, βιομάζα ή σχεδόν οποιοδήποτε υδρογονάνθρακα με αντίδραση με ατμό ή οξυγόνο. Το syngas είναι ένας κρίσιμος ενδιάμεσος πόρος για παραγωγή υδρογόνου, αμμωνίας, μεθανόλης και συνθετικών καυσίμων υδρογονανθράκων. Επίσης, χρησιμοποιείται και ως ένα ενδιάμεσο στην παραγωγή συνθετικού πετρελαίου για τη χρήση του ως καύσιμο ή λιπαντικό.
- 4) Βιοκαύσιμα – περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο τον κόσμο. Είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος λόγω του συνολικού τους ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα. Αυτές οι κατηγορίες αντιπροσωπεύουν δυνητικά άφθονες πηγές ενέργειας και προσφέρουν ελπιδοφόρες προοπτικές.

### 3.3.2 Μη κλασσικά καύσιμα μικροστροβίλων

Εκτός από τα τυπικά καύσιμα φυσικό αέριο (τυπική θερμογόνο ικανότητα μεταξύ 39 MJ/Kg και 46 MJ/Kg) και Ντίζελ Νο2 (42 MJ/Kg), υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για αέρια χαμηλού BTU (1BTU = 1055 Joules), συνθετικά αέρια (syngas) , ακόμη και υγρών καυσίμων (μαζούτ, νάφθα και συμπυκνώματα αερίου). Τα αέρια χαμηλών BTU είναι καύσιμα με θερμογόνο δύναμη μεταξύ 10 και 35 MJ/kg. Ο όρος syngas αναφέρεται σε συνθετικά παραγόμενα αέρια που έχουν ακόμη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, μεταξύ 4 και 12 MJ/Kg. αυτά τα καύσιμα. Το 2005 το τυπικό αέριο καύσιμο ήταν η βασική καύσιμη ύλη στο πεδίο των αεριοστροβίλων και συγκεκριμένα των μικροστροβίλων με ποσοστό που ανερχόταν στο 86%. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) , το οποίο έχει κατά βάση ιδιότητες κοντινές σε αυτές του φυσικού αερίου.

Τα υγρά και τα μη-τυπικά καύσιμα αποτελούσαν τη δεύτερη μεγάλη ομάδα το έτος αυτό σε σχετικά μικρό ποσοστό 14%. Όμως, τα μη τυπικά αέρια καύσιμα ,όπως το syngas ή τα καύσιμα χαμηλού BTU παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης το 2020 αυξανόμενα κατά 6%. Τα ποσοστά των μη συμβατικών καυσίμων και του υγροποιημένου φυσικού αερίου αυξάνονται ουσιαστικά.

Το syngas είναι ο άλλος παράγοντας αυξημένης σημασίας στις νέες τάσεις της αγοράς. Ο λόγος είναι το αυξημένο ενδιαφέρον για ευελιξία στα καύσιμα, καθώς και δέσμευσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> για την υποστήριξη καθαρών περιβαλλοντικών στόχων.

### 3.4.1 Χρήση βιοαερίου στους μικροστρόβιλους

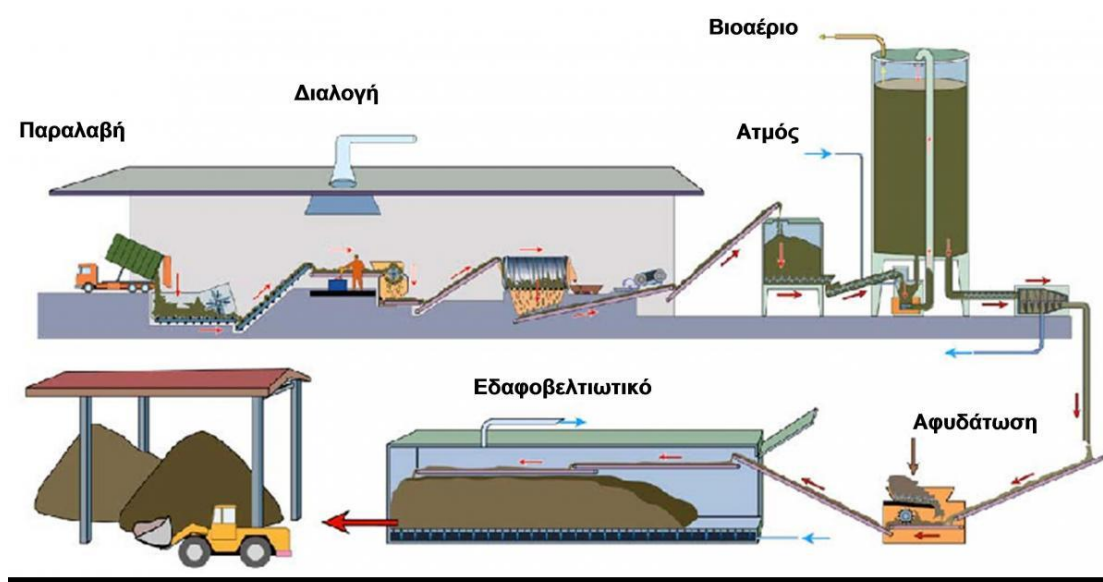
Το βιοαέριο παράγεται από την αναερόβια χώνευση ζωικών αποβλήτων-υπολειμμάτων, βιομηχανικών αποβλήτων και λυμάτων καθώς και από αστικά οργανικά απορρίμματα, κυρίως σε μονάδες βιολογικού καθαρισμού και σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ). Αναερόβια χώνευση είναι η ζύμωση των οργανικών ουσιών των απορριμμάτων απουσία οξυγόνου. Καθώς η στερεή βιομάζα αποσυντίθεται παράγεται ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, το μεθάνιο. Το μεθάνιο είναι πλούσιο σε ενέργεια και αποτελεί το κύριο συστατικό του βιοαερίου. Η τυπική σύσταση του βιοαερίου είναι 65% μεθάνιο και 35% διοξείδιο του άνθρακα. Το βιοαέριο καίγεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μπορεί να αξιοποιηθεί και για παραγωγή θερμότητας μέσω της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων και του ψυκτικού μέσου των μηχανών, για να καλυφθούν ανάγκες της διεργασίας ή/και άλλες ανάγκες θέρμανσης (τηλεθέρμανση κτιρίων). Επίσης μπορεί να διοχετεύει και στο δίκτυο του φυσικού αερίου 11 να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό καύσιμο μεταφορών για μηχανές εσωτερικής καύσης.

Τέλος, το εναπομένον οργανικό υπόλειμμα με διαχωρισμό, εξάτμιση και κατάλληλη τροποποίηση μπορεί να πωληθεί σαν στερεό και υγρό λίπασμα. Κατά την ταφή των στερεών απορριμμάτων σε κατάλληλους χώρους λαμβάνεται μέριμνα κατασκευής εγκαταστάσεων και συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου όπως έχει αναφερθεί παραπάνω. Ανάλογα με το μέγεθος του χώρου υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου μπορεί να είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη. Η συλλογή του βιοαερίου από χώρους υγειονομικής ταφής γίνεται σήμερα με κατάλληλες επεμβάσεις, ακόμα και όταν δεν έχει ληφθεί μέριμνα κατασκευής των κατάλληλων συστημάτων κατά τη δημιουργία του χώρου υγειονομικής ταφής. Για τη συλλογή του τοποθετούνται κατά διαστήματα σωληνώσεις, που οδηγούν το παραγόμενο βιοαέριο στους χώρους συγκέντρωσης και αποθήκευσής του. Η ενεργειακή αξία ισοδυναμεί με το 20-40% της θερμογόνου δύναμης της βιομάζας και ένα κυβικό μέτρο βιοαερίου υποκαθιστά 0,661 ντίτζελ ή 0,751 πετρελαίου 0,85 κυβικά μέτρα κάρβουνου.

### 3.4.2 Οφέλη ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Η χρήση του βιοαερίου συνεπάγεται αρκετά οφέλη, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα:

- Η πρώτη ύλη (γεωργό-κτηνοτροφικά απόβλητα, οργανικό μέρος των απορριμμάτων, κ.λπ. ) έχει συχνά μηδενική ή αρνητική αξία, ενώ τα προϊόντα της μονάδας έχουν αναμφισβήτητη εμπορική αξία.
- Βοηθάει να επιλυθούν τα προβλήματα διαχείρισης αποβλήτων και απορριμμάτων χρησιμοποιώντας τα ως πρώτη ύλη.
- Συμβολή στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης από τρίτες χώρες.
- Σημαντικά κέρδη στις εκάστοτε εταιρείες.
- Αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, απ' την καύση της οποίας δεν εκλύονται αέρια του θερμοκηπίου .



Σχήμα 39. Διαδικασία παραγωγής Βιοαερίου

### 3.4.3 Αεριοποίηση Βιοαερίου

Αεριοποίηση είναι η μετατροπή της βιομάζας σε μίγμα εύφλεκτων αερίων από τη μερική οξείδωση της οργανικής ύλης παρουσία ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες, στην περιοχή 800- 900 ° C. Η βιομάζα προσφέρεται για αεριοποίηση λόγω του υψηλού περιεχομένου σε πτητικά συστατικά (70-86% σε ξηρή βάση). Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης που είναι μίγμα υδρογόνου (H<sub>2</sub>), μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και μονοξειδίου (CO), καθώς και μικρών ποσοτήτων διοξειδίου και υδρογονανθράκων, έχει χαμηλή θερμαντική δύναμη (4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>).

Ακαθαρσίες (αλκάλια, SO<sub>2</sub> και τέφρα) μπορούν να απομακρυνθούν από συστήματα καθαρισμού, αφήνοντας ένα καθαρό καύσιμο αέριο με ενεργειακό περιεχόμενο περίπου το 20-25% του φυσικού αερίου. Το αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο για να τροφοδοτήσει αεριοστρόβιλους για την παραγωγή ενέργειας. Ιδιαίτερα ελκυστική τεχνολογία είναι τα εργοστάσια συνδυασμένου κύκλου (BIG/CC) Biomass Integrated Gasification Combined Cycle. Εναλλακτικά το αέριο (syngas) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη στην παραγωγή υγρών καυσίμων για τη μεταφορά, πχ μεθανόλη και υδρογόνο .

### 3.4.4 Πλεονεκτήματα της αεριοποίησης

Η αεριοποίηση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως σε σύγκριση με την συμβατική καύση:

- 1) Σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις καύσης, στις μονάδες αεριοποίησης στόχος είναι η παραγωγή ενός αερίου καυσίμου από την θερμική διάσπαση των οργανικών ενώσεων. Το αέριο αυτό είναι αρκετά «ευέλικτο» και μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις. Οι χρήσεις του αερίου σύνθεσης παρουσιάζονται στην παράγραφο
- 2) Οι μονάδες αεριοποίησης μπορούν να επιτύχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, αν και προς το παρόν οι αισιόδοξες εκτιμήσεις ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης 35% δεν έχουν πραγματοποιηθεί.
- 3) Τα στερεά κατάλοιπα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές (οδικά έργα κ.α.) είτε να θαφτούν με ασφαλή τρόπο, καθώς είναι πλήρως σταθεροποιημένα και αδρανοποιημένα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών.
- 4) Η εφαρμογή συστήματος καθαρισμού στο παραγόμενο αέριο, πριν αυτό οδηγηθεί σε εγκαταστάσεις καύσης, έχει το πλεονέκτημα της επεξεργασίας μικρότερου όγκου αερίου από την περίπτωση όπου ο καθαρισμός γίνεται στο καυσαέριο.



Σχήμα 40. Συλλογή αποβλήτων και υπολειμμάτων για Βιομάζα



### 3.5 Συνθετικό Αέριο και Συνθετικά Καύσιμα

Τα καύσιμα που έχουν ως κύριο συστατικό τον άνθρακα, όπως βαρέα προϊόντα δύλισης, γαιάνθρακας ή λιγνίτης που ανήκουν στην κατηγορία των συνθετικών καυσίμων θα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο ως εναλλακτικά καύσιμα, με την προϋπόθεση ότι η καύση τους πραγματοποιείται σε συνθήκες αποδοτικές και ευνοϊκές προς το περιβάλλον.

Το συνθετικό αέριο παρέχει αυξημένες δυνατότητες ευελιξίας για τη χρήση των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία που μετατρέπει οργανικά ή ορυκτά ανθρακούχα υλικά, όπως η βιομάζα, σε ένα αέριο μίγμα που ονομάζεται αέριο σύνθεσης ή συνθετικό αέριο (Syngas) και είναι το ίδιο ένα είδος καυσίμου. Το συνθετικό αέριο μπορεί να καεί άμεσα σε κινητήρες αερίου, ή να μετατραπεί μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch σε συνθετικά καύσιμα.

Το πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι η χρήση του αερίου σύνθεσης είναι δυνητικά πιο αποτελεσματική από ότι η άμεση καύση του αρχικού καυσίμου, επειδή μπορεί να καίγεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή ακόμη και σε κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον, η μέθοδος υψηλής θερμοκρασίας αφαιρεί τα διαβρωτικά στοιχεία της τέφρας όπως το χλώριο και το κάλιο, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρού αερίου από προβληματικά καύσιμα.

Τόσο από προοπτική αποδοτικότητας, όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά, το Ολοκληρωμένο Σύστημα Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου ( Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική λύση για τις μακροπρόθεσμες ανάγκες ισχύος.

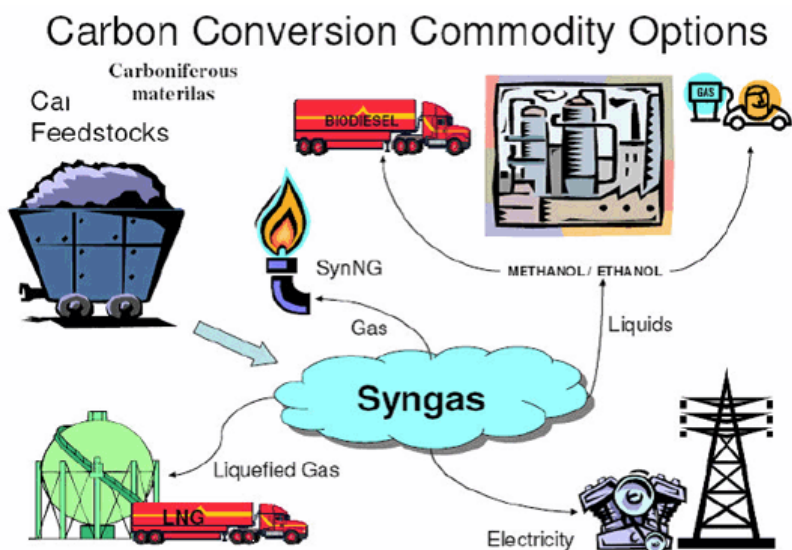
Το IGCC στην πραγματικότητα συνδυάζει :

- 1) Προηγμένη απόδοση μετατροπής
- 2) Στερεές και υγρές πρώτες ύλες από τοπικές πηγές
- 3) Χαμηλό κόστος επένδυσης
- 4) Μεγαλύτερο έλεγχο στην εκπομπή μολυσματικών παραγόντων (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Υδράργυρος, Αιωρούμενα Σωματίδια)
- 5) Ετοιμότητα δέσμευσης CO<sub>2</sub>, σε συνδυασμό με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα
- 6) Ευελιξία καυσίμων

Το καθαρισμένο συνθετικό αέριο (purified natural gas) όχι μόνο παρέχει αυξημένη δυνατότητα ευελιξίας των αξιοποιήσιμων πηγών ενέργειας, αλλά επιτρέπει και τη χρήση τους στους αεριοστρόβιλους, όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμικής ενέργειας και την παγίδευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα. Η διαφορά – όπως ορίζεται από τη Siemens – μεταξύ ενός αρτίου χαμηλών BTU και του συνθετικού αερίου είναι ότι το πρώτο δεν περιέχει κάποια ποσότητα υδρογόνου πέρα από τα τυπικά του συστατικά. Από την άλλη, το συνθετικό αέριο έχει ένα κύριο συστατικό, το οποίο είναι το υδρογόνο. Η φύση του υδρογόνου είναι ότι έχει την 40 υψηλότερη αντιδραστικότητα και ταχύτητα φλόγας σε σχέση με όλα τα άλλα εύφλεκτα αέρια. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος καύσης και στις σχετικές δοκιμές καύσης υψηλής πίεσης.

Για να αντιστοιχηθεί η αντιδραστικότητα του συνθετικού αερίου με την κινητική της καύσης των τυπικών καυσίμων, αυτό αναμιγνύεται με άζωτο ( ένα παραπροϊόν από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα), διοξείδιο του άνθρακα και/ή ατμό ως αδρανείς ποσότητες.

Το συνθετικό αέριο έχει πολύ χαμηλή θερμογόνο ικανότητα ανάμεσα σε 4 και 12 MJ/Kg με αποτέλεσμα η ροή καυσίμου – σε σταθερή θερμική ισχύ εισόδου - να είναι υψηλότερη σε σχέση με των τυπικών καυσίμων. Η ιδιότητα αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη και σε συνδυασμό με το όριο αντοχής σε πίεση για το συμπιεστή του αεριοστρόβιλου και το σχεδιασμό του. Λόγω της χαμηλής κατώτερης θερμογόνο ικανότητας, το σύστημα αερίου καυσίμου πρέπει να τροποποιηθεί βασισμένο σε αποδεδειγμένες τεχνολογίες σχεδιασμού για να ανταποκριθεί στις μεγάλες ποσότητες του καυσίμου. Υψηλότερη «προσπάθεια» ανταπόκρισης στην αυξημένη ροή αποδίδει αύξηση στην ενέργεια εξόδου και στην αποδοτικότητα.



Σχήμα 41. Παραγωγή Συνθετικού Αερίου

### 3.6 Βασικά συστατικά Αέριου Σύνθεσης

Τα βασικά συστατικά του αερίου σύνθεσης είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Η αναλογία αυτή καθώς και τα επίπεδα των υπόλοιπων συστατικών του αερίου σύνθεσης εξαρτώνται από την διαδικασία της αεριοποίησης και την στερεή ύλη τροφοδοσίας. Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους:

- Καύση για παραγωγή ατμού Το πλεονέκτημα που παρουσιάζεται έναντι της συμβατικής καύσης είναι ότι τα αέρια καθαρίζονται πριν την καύση και έτσι ο ατμολέβητας μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες πιέσεις και ο υπερθερμαντήρας του ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Έτσι επιτυγχάνονται βελτιωμένοι βαθμοί απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, της τάξης του 30%.

- Τροφοδοσία μηχανής εσωτερικής καύσης που κινεί ηλεκτρογεννήτρια  
Με την προϋπόθεση ότι το αέριο σύνθεσης έχει υποστεί πολύ καλό καθαρισμό, η απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ξεπεράσει το 40%.

- Κίνηση αεριοστρόβιλου και ατμοπαραγωγή σε συνδυασμένο κύκλο  
Και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός του παραγόμενου αερίου, ώστε να επιτύχουμε ηλεκτρικούς βαθμούς απόδοσης της τάξης του 40%.

- Παροχή του αερίου σε βιομηχανία, όπως τσιμεντοβιομηχανία για απευθείας καύση σε εστία. Στην περίπτωση αυτή μειώνονται σημαντικά οι απαιτήσεις για καθαρισμό.

- Παραγωγή χημικών

Το αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για την σύνθεση χημικών, όπως αμμωνία, μεθανόλη κλπ. Στην περίπτωση αυτή το αέριο σύνθεσης απαιτείται να έχει μέση θερμογόνο δύναμη 15-25 MJ/Nm<sup>3</sup>.

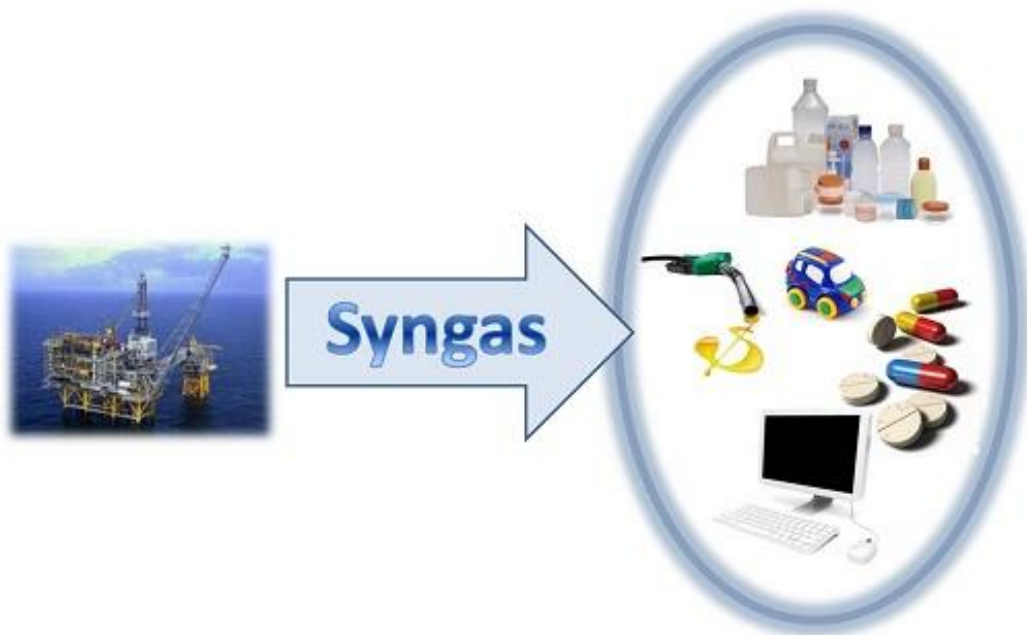
- Παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου

Το αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή αερίου υψηλής θερμογόνου ικανότητας (30-40MJ/Nm<sup>3</sup>), που μπορεί να αντικαταστήσει το φυσικό αέριο. Αυτή είναι και η χρήση του αερίου σύνθεσης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

### 3.7 Καθαρισμός Αερίου Σύνθεσης (Syngas)

Το αέριο που προκύπτει από την αεριοποίηση (αέριο σύνθεσης), εκτός από τα βασικά συστατικά του, περιέχει και πολλές «ακαθαρσίες». Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικό να υποστεί τις κατάλληλες τεχνικές καθαρισμού, πριν την περαιτέρω χρήση του.

Η σύσταση του αερίου σύνθεσης είναι πολύ σημαντική. Όταν η σύσταση είναι γνωστή, η θερμογόνος ικανότητά του είναι επίσης γνωστή. Άρα το αέριο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μηχανή για παραγωγή ενέργειας, καθώς, λόγω της γνωστής θερμογόνου ικανότητας, ο έλεγχός της είναι εύκολος. Όμως και στην περίπτωση που το αέριο θα υποστεί περαιτέρω καταλυτικές διαδικασίες, όπως η μεθανοποίηση, είναι σημαντικό να απαλλαγεί από βλαβερά για τον καταλύτη συστατικά. Οι βασικές «ακαθαρσίες» που πρέπει να απομακρυνθούν από το αέριο είναι:  $H_2S$ , αλκάλια, βαρέα μέταλλα και κυρίως πίσσες.

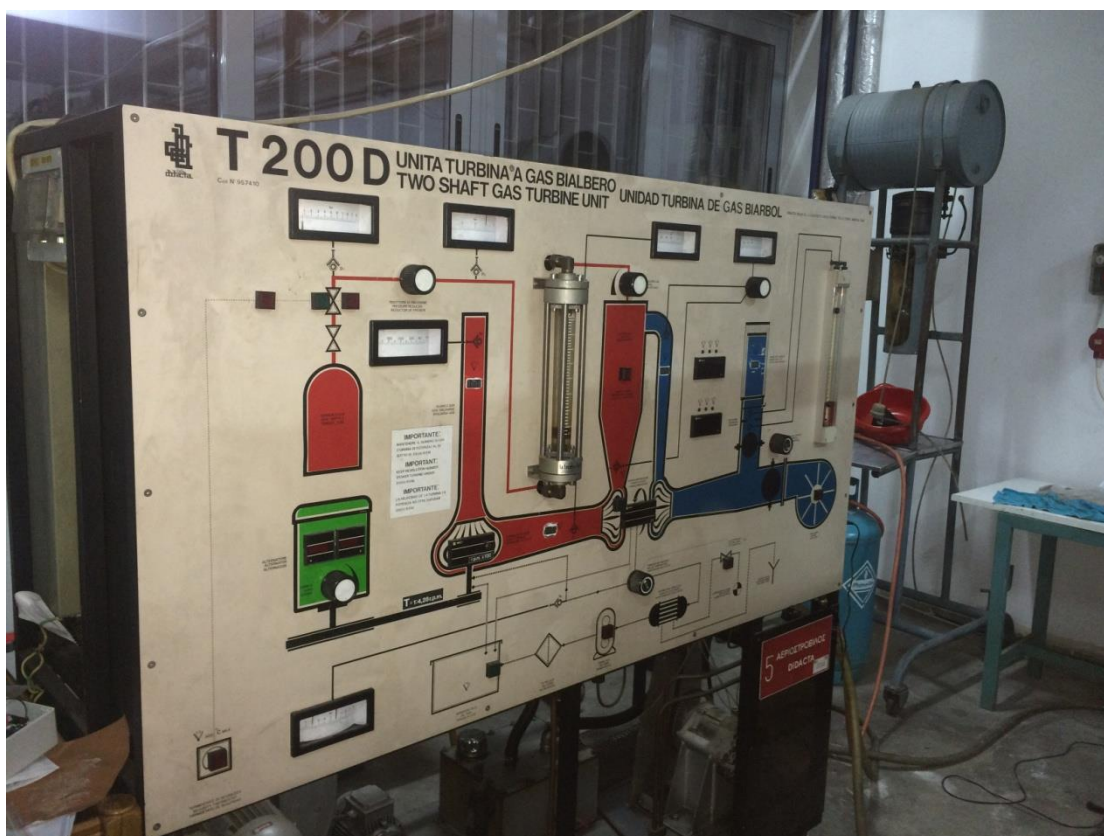


Σχήμα 42. Αεριοποίηση Syngas

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ

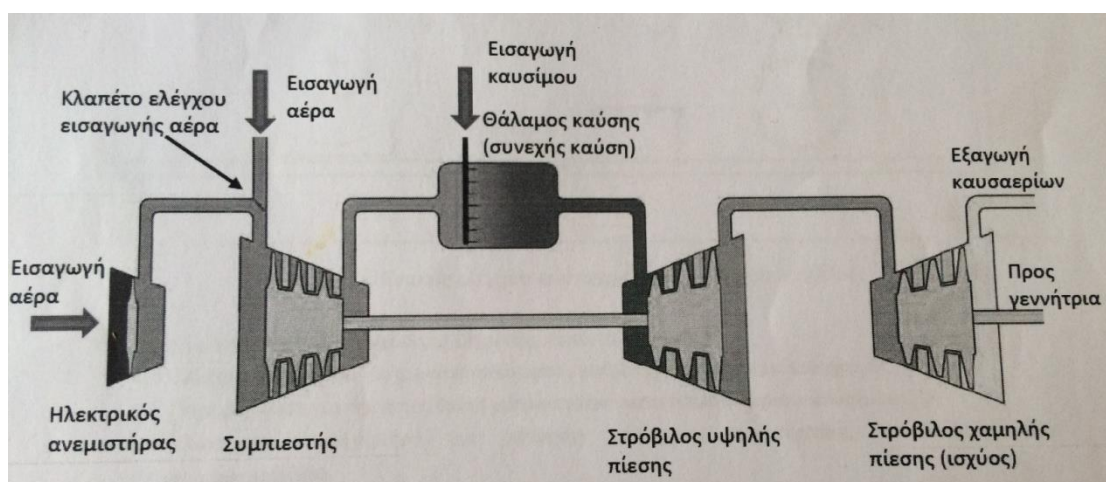
Ο εκπαιδευτικός αεριοστρόβιλος που βρίσκεται στο εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης είναι ο DIDACTA T 200 D είναι ένας αεριοστρόβιλος μονού άξονα με στρόβιλο ισχύος ο οποίος μεταδίδει κίνηση σε μια γεννήτρια οπού παράγεται ρεύμα. Ο συμπιεστής και οι δυο στρόβιλοι είναι φυγοκεντρικού τύπου. Η διάταξη διαθέτει και ηλεκτρικό ανεμιστήρα ο οποίος τροφοδοτεί με αέρα τη μηχανή μέχρι να αυξηθεί ο αριθμός των στροφών του συμπιεστή σε τέτοιο βαθμό ώστε να μπορεί να τροφοδοτείται με αέρα η μηχανή χωρίς τη χρήση του ηλεκτρικού ανεμιστήρα. Ο έλεγχος του αέρα εισαγωγής πραγματοποιείται με ένα κλαπέτο το οποίο υπάρχει στο σύστημα εισαγωγής ώστε ο αέρας να προσέρχεται στον συμπιεστή είτε από τον ανεμιστήρα, είτε αναρροφώμενος κατευθείαν από την ατμόσφαιρα. Υπάρχουν μετρητικές διατάξεις σε διάφορα σημεία της μηχανής ώστε να παίρνονται μετρήσεις θερμοκρασίας και πιέσεις. Η ισχύς από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω της γεννήτριας μπορεί να ελέγχεται. Υπάρχουν επίσης διατάξεις για μέτρηση της εισερχόμενης μάζας αέρα και του καυσίμου που καταναλώνει η μηχανή. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το προπάνιο.



Σχήμα 43. Αεριοστρόβιλος Εργαστηρίου DIDACTA T 200 D

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πειραματικού αεροστροβίλου DIDACTA T 200 D είναι:

- 1) ο λόγος πιέσεων συμπιεστή  $\tau_c = 1.5$
- 2)Μεγίστη ταχύτητα περιστροφής συμπιεστή -στροβίλου =50.000 rpm
- 3) Μεγίστη ταχύτητα περιστροφής στροβίλου ισχύος =20.000 rpm
- 4) Σχέση μετάδοσης στροβίλου ισχύος-γεννήτριας 6:1
- 5)Ταχύτητα περιστροφής γεννήτριας : 330 με 3300 rpm
- 6) Μέγιστη απόδοση γεννήτριας :1,5 KW στις 3300 rpm

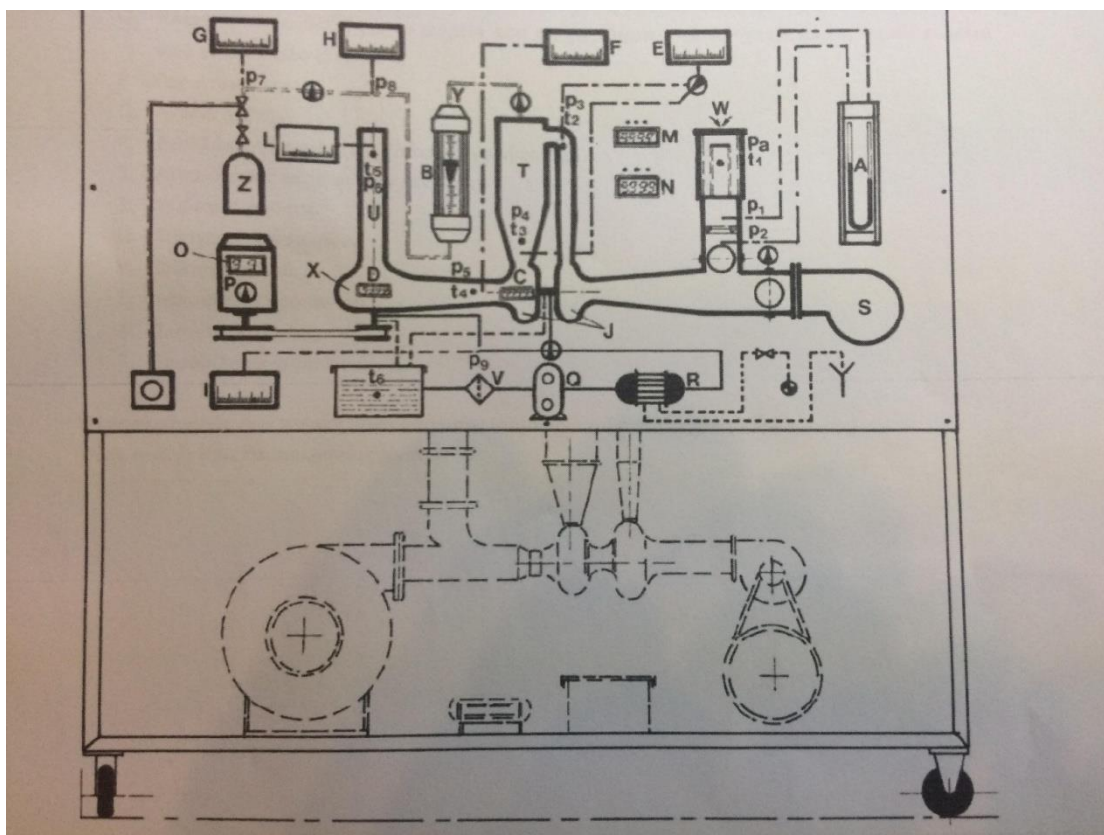


Σχήμα 44. Τα δομικά μέρη του αεροστροβίλου

..



Τα στοιχεία στον πίνακα έλεγχου της μηχανής βάση του παρακάτω σχήματος είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 45. Πίνακας ελέγχου αεριοστρόβιλου Didacta T200

- A) Διάφραγμα με μανόμετρο οινόπνεύματος για μέτρηση του αέρα εισαγωγής.
- B) Παροχόμετρο για την απευθείας μέτρηση την κατανάλωση αερίου καυσίμου
- C) Ηλεκτρονικό ταχύμετρο για μέτρηση ταχύτητας περιστροφής του άξονα του αεριοστρόβιλου
- D) Ηλεκτρονικό ταχύμετρο για μέτρηση ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου ισχύος
- E) Μανόμετρο για τη μέτρηση της πίεσης στην έξοδο και την είσοδο του αερίου από το θάλαμο καύσης.
- F) Μανόμετρο για την μέτρηση της πίεσης στην έξοδο του αερίου από το στρόβιλο
- G) Μανόμετρο για τον έλεγχο του αερίου καυσίμου από την μπουκάλα
- H) Μανόμετρο για τον έλεγχο του αερίου καυσίμου προς το θάλαμο καύσης
- I) Μανόμετρο για τον έλεγχο πίεσης λιπαντικού
- L) Μανόμετρο για τον έλεγχο της πίεσης στην εξαγωγή των καυσαερίων
- M) Ηλεκτρονικό θερμομέτρο για των έλεγχο των θερμοκρασιών  $t_1$ (εισαγωγή αέρα ),  $t_2$  (μετά το συμπιεστή) και  $t_6$  ( θερμοκρασία λιπαντικού)

N) Ηλεκτρονικό θερμομέτρο για τον έλεγχο των θερμοκρασιών t3 (έξοδος θαλάμου καύσης), t4(μετά το στρόβιλο) και t5 (στην εξαγωγή καυσαερίων )

O) Ηλεκτρονική ένδειξη για το φορτίο που απορροφάται από τη γεννήτρια η οποία κινείται από το στρόβιλο ισχύος

P) Γεννήτρια

Q) Αντλία λαδιού

R) Εναλλάκτη θερμότητας λαδιού ( υδρόψυκτος )

S) Ανεμιστήρας αέρα για την εκκίνηση

T) Θάλαμος καύσης

U) Εξάτμιση καυσαερίων

V) Φίλτρο λαδιού

Z) Μπουκάλα προπανίου

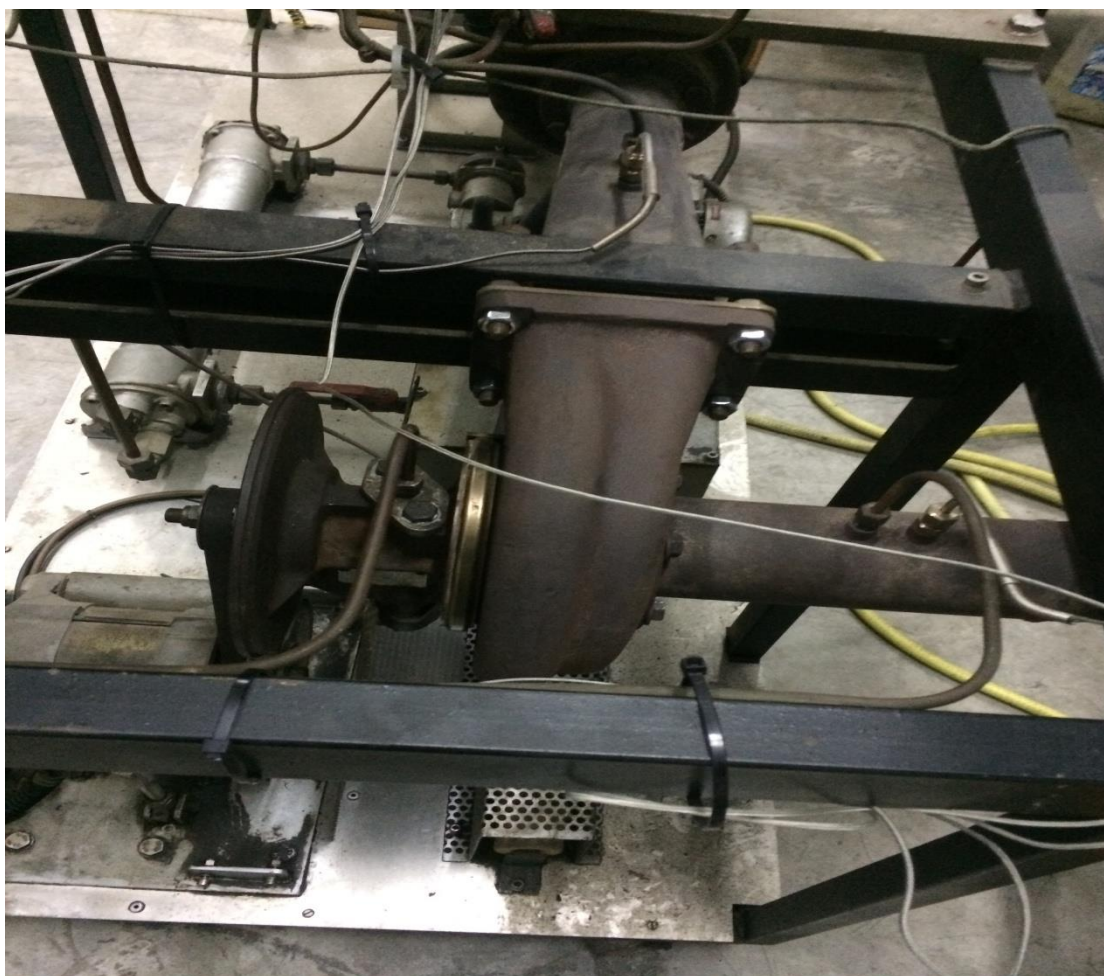
X) Στρόβιλος ισχύος

J) Στρόβιλος- συμπιεστή



## 4.2 ΕΠΙΣΚΕΥΗ-ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Ο στρόβιλος ισχύος χαμηλής πίεσης είναι αεροδυναμικά συνδεδεμένος με το στρόβιλο υψηλής πίεσης. Στην συγκεκριμένη διάταξη αεριοστρόβιλου DIDACTA T200 D ο στρόβιλος ισχύος δίνει κίνηση σε μια γεννήτρια η οποία παράγει ρεύμα. Λόγω κακής συντήρησης ο στρόβιλος ισχύος κατά την λειτουργία του αεριοστρόβιλου έστρεφε με δυσκολία έτσι δεν μετέδιδε την απαιτούμενη κίνηση στην γεννήτρια με αποτέλεσμα η γεννήτρια να μην παράγει ρεύμα. Ο στρόβιλος ισχύος αποσυναρμολογήθηκε για να συντηρηθεί και να αλλάξουν τυχόν κομμάτια τα οποία είναι κατεστραμμένα. Οπότε ο στρόβιλος πρέπει να αφαιρεθεί από την διάταξη να αποσυναρμολογηθεί πάνω στον πάγκο και να επιθεωρηθεί για τυχόν ζημιές. Στην παρακάτω φωτογραφία μπορούμε να διακρίνουμε το στρόβιλο ισχύος συνδεδεμένο με τη γεννήτρια με ένα ιμάντα, και αεροδυναμικά συνδεδεμένο με το στρόβιλο υψηλής πίεσης μέσω σωληνώσεων.



Σχήμα 46. Στρόβιλος ισχύος

Αφού αποσυναρμολογήθηκε και επιθεωρήθηκε ο στρόβιλος πάνω στον πάγκο, παρατηρήθηκε ότι ο σφικτήρας που έκανε τη σύνδεση του πυρήνα του στροβίλου με

το μαντέμι ήταν χαλαρός με αποτέλεσμα η φτερωτή να έρχεται σε επαφή με το μαντέμι. Ο σφικτήρας αντικαταστάθηκε με καινούριο, ο στρόβιλος συναρμολογήθηκε από την αρχή και τοποθετήθηκε πάλι στην διάταξη.



Σχήμα 47. Μαντέμι στροβίλου ισχύος      Σχήμα 48. Φτερωτή στροβίλου ισχύος

Ο σφικτήρας όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία είναι φθαρμένος με εμφανή σημάδια σκουριάς. Στο σημείο που τοποθετείται αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του με το χρόνο λόγω συστολής διαστολής.

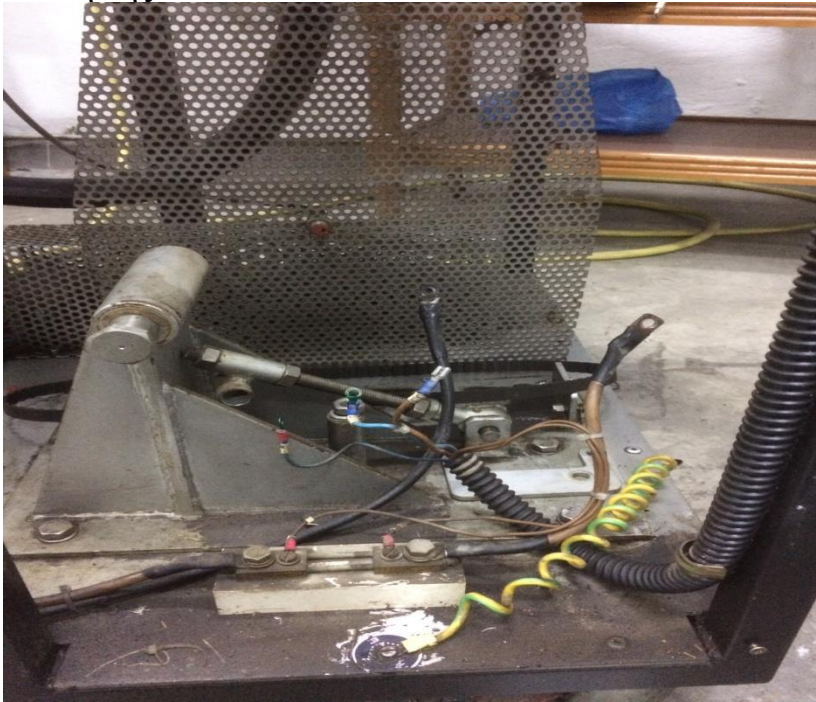


Σχήμα 49. Σφικτήρας

Αφού συναρμολογήσαμε τον στρόβιλο και τον τοποθετήσαμε στη διάταξη εκκινούμε τον αεριοστρόβιλο. Ο στρόβιλος ισχύος στρέφει αυτή τη φορά την γεννήτρια με μεγάλη ευκολία αλλά η γεννήτρια εξακολουθεί να μην παράγει ρεύμα.



Χρησιμοποιήσαμε ένα πολύμετρο για να ελέγξουμε τις καλωδιώσεις της γεννήτριας και να ταυτοποιήσουμε ότι δεν παράγει ρεύμα. Έτσι αφαιρέσαμε την γεννήτρια από την διάταξη για να σταλεί σε μαγαζί το οποίο θα ελέγξει τη λειτουργία και την απόδοση της.

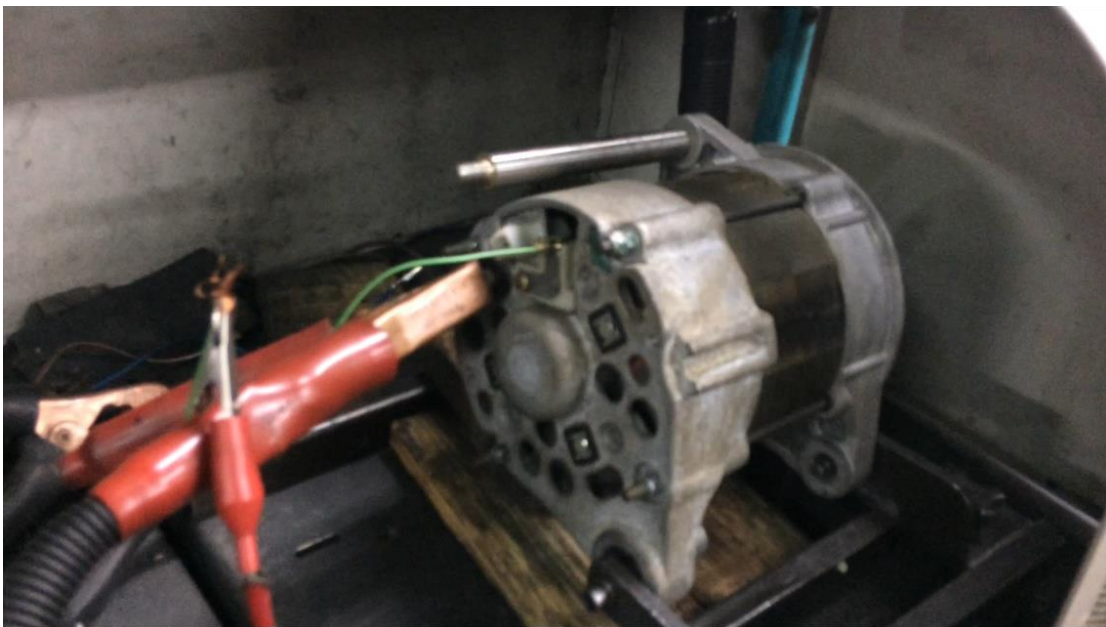


Σχήμα 50. Αφαίρεση της γεννήτριας από τη διάταξη.



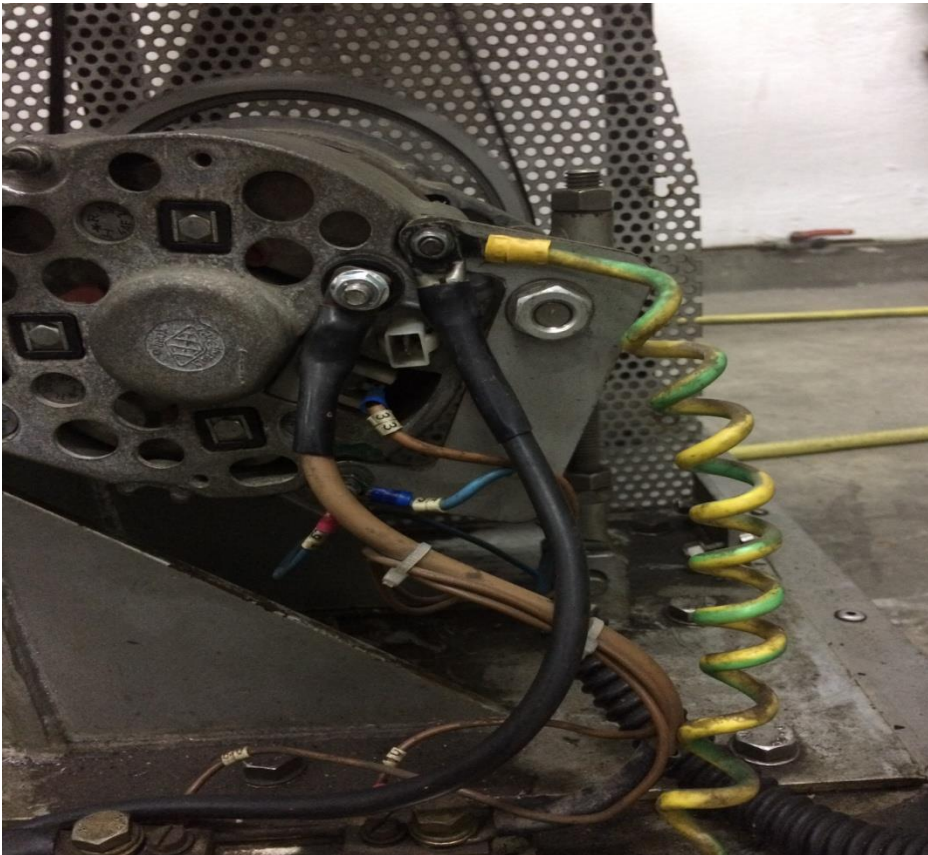
Σχήμα 51. Γεννήτρια διάταξης αεριοστροβίλου

Η γεννήτρια τοποθετήθηκε σε ειδικό διαγνωστικό μηχάνημα. Μετά το πέρας της διαδικασίας της επιθεώρησης και της διάγνωσης η λειτουργία και η απόδοση της γεννήτριας χαρακτηρίστηκε πολύ καλή βάσει της χρονολογίας της. Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος το οποίο παράγει η γεννήτρια σε συνάρτηση των στροφών της είναι ικανοποιητικές. Το συμπέρασμα είναι ότι η γεννήτρια λειτουργεί σωστά και το πρόβλημα βρίσκεται σε κάποιο άλλο τμήμα της διάταξης του αεριοστρόβιλου.



Σχήμα 52. Η γεννήτρια πάνω στο διαγνωστικό μηχάνημα

Κατά τη διαδικασία της επανατοποθέτησης της γεννήτριας παρατηρήσαμε λάθος στη συνδεσμολογία της. Υπήρχαν καλώδια τοποθετημένα σε λάθος θέση. Αυτό είχε ως συνέπεια να επηρεάζεται το φορτίο LOAD δηλαδή οι ενδείξεις τάσης και ρεύματος να είναι λανθασμένες. Η διάταξη δυσλειτουργούσε από την γεννήτρια και μετά. Η τελευταία δεν μπορούσε να παράγει ρεύμα έτσι η αντίσταση που βρισκόταν στο τέλος της διάταξης ήταν αδρανής. Μετά την τοποθέτηση όμως των καλωδίων στη σωστή θέση το πρόβλημα παρέμεινε το ίδιο.



Σχήμα 53. Τοποθέτηση Γεννήτριας

Το επόμενο βήμα μας ήταν να ανοίξουμε τον κεντρικό πίνακα ρεύματος και να ελέγξουμε όλες τις καλωδιώσεις πρώτα οπτικά. Έπειτα με ένα πολύμετρο ελέγξαμε τη συνέχεια των καλωδίων και των διακοπών δηλαδή αν διαρρέονται από ρεύμα χωρίς να υπάρχει κάποια διακοπή στο κύκλωμα. Μετά από πολλές δοκιμές βρήκαμε δυο διακόπτες οι οποίοι όταν ήταν ανοιχτοί, στη θέση ON δεν διαρρέονταν από ρεύμα. Όταν οι διακόπτες αντικαταστάθηκαν εκκινήσαμε τη διάταξη η οποία πλέον δούλευε άψογα, και έτσι είμαστε έτοιμοι να αρχίσουμε την πειραματική διαδικασία και να πάρουμε μετρήσεις.

### 4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΑΚΑΣΙΑ

Αρχικά ακολουθούμε τα βήματα της διαδικασίας εκκίνησης που μας υποδεικνύει ο κατασκευαστής και λαμβάνουμε υπόψη όλα τα μέτρα προστασίας που προβλέπονται κατά την εκκίνηση. Ανοίγουμε τις βάνες νερού, ελέγχουμε τη στάθμη του λιπαντικού ανοίγουμε το γενικό διακόπτη ρεύματος και το διακόπτη παροχής ρεύματος της μηχανής. Ο περιστροφικός διακόπτης LOAD είναι τέρμα δεξιά στο μέγιστο φορτίο. Επίσης το κλαπέτο της εισαγωγής αέρα να είναι στη θέση όπου η τροφοδοσία αέρα να γίνεται με ανεμιστήρα. Στη συνέχεια ανοίγουμε την μπουκάλα προπανίου και πιέζουμε και το κουμπί OIL PUMP για να εκκίνηση η ηλεκτρική αντλία λαδιού. Κανονικά πιέζουμε το κουμπί Cmax για απενεργοποίηση των ασφαλιστικών διατάξεων αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση οι ασφαλιστικές δικλίδες έχουν απενεργοποιηθεί, για την πιο εύκολη και γρήγορη εκκίνηση της διάταξης. Η ένδειξη πίεσης προπανίου στην μπουκάλα αερίου μεταβάλλεται και έχει ανοίξει η παροχή προς τη μηχανή. Έπειτα ρυθμίζουμε τον περιστροφικό διακόπτη στραγγαλισμού της πίεσης του αερίου ώστε η πίεση του αερίου να δείχνει 1.5 με 2 bar και σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνά τα 3 bar. Πιέζουμε το κουμπί εκκίνησης του ανεμιστήρα και με συνεχώς πατημένο το κουμπί εκκίνησης του αεριοστροβίλου, ανοίγουμε σταδιακά και με μικρές κινήσεις τον περιστροφικό διακόπτη ρύθμισης παροχής αερίου. Παρατηρούμε το όργανο παροχής αερίου να μεταβάλλει την ένδειξή του ενώ ακούγεται και ένας χαμηλός υπόκωφος θόρυβος που δηλώνει την έναυση. Εάν η ένδειξη της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης αυξάνει, τότε η έναυση πραγματοποιήθηκε ομαλά και μπορούμε να σταματήσουμε να πιέζουμε το κουμπί εκκίνησης του αεριοστροβίλου .

Τοποθετούμε έναν μετρητή στροφών με λείζερ στο καρέ το οποίο βγαίνει από το στρόβιλο ισχύος και μεταδίδει την κίνηση του αεριοστροβίλου στη γεννήτρια για να μετρήσουμε τις στροφές του στροβίλου ισχύος ( $N_{PT}$ ). Η ατμοσφαιρική πίεση την ημέρα των μετρήσεων είναι  $P_a = 1010,67 \text{ hPa}$  , θερμοκρασία  $T_a = 30.4$  , υγρασία  $R_h = 35.4\%$  και η πίεση της στρόφιγγας προπανίου του αεριοστροβίλου  $P_f = 2.5 \text{ bar}$ . Ρυθμίζουμε από την παροχή καυσίμου τις στροφές του συμπιεστή ( $N_{GT}$ ) στις 28600 περίπου στροφές το λεπτό και παίρνουμε τις πρώτες μετρήσεις από τις ενδείξεις που βρίσκονται στο πάνελ της διάταξης δηλαδή στροφές στροβίλου ισχύος ( $N_{PT}$ ), θερμοκρασία αέρα εισαγωγής  $t_1$ , θερμοκρασία μετά το συμπιεστή  $t_2$  , θερμοκρασία μετά το θάλαμο καύσης  $t_3$  , θερμοκρασία μετά το στρόβιλο ισχύος  $t_4$ , θερμοκρασία καυσαερίων  $t_5$ , ροή καυσίμου  $m_i$ , πίεση παροχής καυσίμου  $P_3$  , την τάση Volt και το ρεύμα  $A$  της γεννήτριας. Κρατώντας σταθερή την παροχή του καυσίμου και αυξάνοντας το φορτίο από τον περιστροφικό διακόπτη LOAD παίρνουμε εκ νέου καινούρια μέτρηση, παρατηρώντας ότι οι στροφές του συμπιεστή πέφτουν ελάχιστα η τάση αυξάνεται ενώ το ρεύμα μειώνεται λόγω της μεγάλης μείωσης των στροφών του στροβίλου ισχύος ο οποίος δίνει κίνηση στη γεννήτρια..Οι θερμοκρασίες  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  μεταβάλλονται επίσης λόγω της μεταβολής των στροφών των στροβίλων. Η πίεση  $P_3$  και η ροή καυσίμου  $m_i$  μένει σταθερή.

Τέλος εκτελούμε τη διαδικασία τερματισμού ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή. Πρώτα κλείνουμε τη στρόφιγγα παροχής της μπουκάλας προπανίου. η καύση θα τερματιστεί από μόνη της ενώ με αυτό τον τρόπο θα αδειάσουν και οι σωλήνες μεταφοράς του αερίου. Αφήνουμε τον ανεμιστήρα και την αντλία λαδιού σε λειτουργία μέχρι να πέσει η θερμοκρασία του θαλάμου καύσης κάτω από τους 80 βαθμούς κελσίου και κλείνουμε την παροχή του αερίου GAS FEEDING. Κλείνουμε το γενικό διακόπτη ρεύματος της μηχανής και τις βάνες νερού.



#### 4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

	N <sub>GT</sub>	N <sub>PT</sub>	V(VOLT)	A(A)	T1	T2	T3	T4	T5	P3(bar)	m <sub>t</sub> (gr/s)
1	28600	10030	5,3	5,5	35	50	665	670	568	0,18	0,75
2	28500	5390	8,4	2,3	35	51	682	680	581	0,18	0,75
3	28000	2760	6,8	1,9	35	51	688	687	590	0,18	0,75
4	35400	16950	9,6	2,7	35	58	680	682	604	0,18	0,9
5	36154	13440	15,9	4,4	35	59	687	670	598	0,18	0,9
6	36050	9220	16,5	4,5	35	59	664	668	593	0,18	0,9
7	35000	3560	11,4	3	36	59	682	685	610	0,18	0,9
8	34700	1825	7,9	2	36	59	687	691	617	0,18	0,9
*9	40250	20100	13,1	3,7	34	62	685	688	590	0,22	1
10	40600	15960	21,2	6	35	65	673	676	602	0,22	1
11	40800	11410	22,2	6,3	35	65	672	670	599	0,22	1
12	40200	7060	18,8	5,3	35	64	686	683	609	0,22	1
13	40050	4200	14,7	4,1	36	64	689	689	617	0,22	1
14	39905	2740	11,9	3,3	36	64	694	694	624	0,22	1
15	45087	3050	14,9	4,2	34	69	696	698	613	0,28	1,15
16	45306	3970	17,2	4,8	34	70	699	699	627	0,28	1,15
17	45400	6390	21,4	6	35	70	697	695	626	0,28	1,15
18	45870	10590	25,5	7,3	35	70	688	682	612	0,28	1,15
19	44200	15800	26,3	7,4	35	69	680	672	602	0,28	1,15

\* Από την μέτρηση Νο9 και μετά ο δείκτης πίεσης P3 δεν ήταν σταθερός έτσι οι μετρήσεις του πίνακα δεν είναι ακριβείς.



Με τη σχέση:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{fb} \frac{f_{tb}}{f_{to}} \sqrt{\frac{288}{T_b}} \times 10^{-3} \quad \text{kg/s}$$

και τον παρακάτω πίνακα διορθώνουμε τη παροχή της μάζας του καυσίμου που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης.

Όπου  $f_{to}$  = συντελεστής διόρθωσης ροής βαλβίδας = 1,581 και  $f_{th}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης της πίεσης τροφοδοσίας καυσίμου.

P(bar)	ftb	P(bar)	ftb	P(bar)	ftb	P(bar)	fth	P(bar)	fth	P(bar)	fth
1	1.414	1.5	1.581	2	1.732	2.5	1.876	3	2	3.5	2.121
1.1	1.449	1.6	1.612	2.1	1.76	2.6	1.897	3.1	2.024	3.6	2.144
1.2	1.483	1.7	1.643	2.2	1.788	2.7	1.923	3.2	2.049	3.7	2.167
1.3	1.516	1.8	1.673	2.3	1.816	2.8	1.949	3.3	2.073	3.8	2.19
1.4	1.549	1.9	1.702	2.4	1.843	2.9	1.974	3.4	2.097	3.9	2.213

Σχήμα: Πίνακας συντελεστών διόρθωσης.

### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Σύμφωνα με τη μέτρηση Νο1:

Compression Ratio CR=1 + P3=1,180

$P_e = (V \times A) / 1000 = 5,3 \times 5,5 = 0,029 \text{ KW}$

$Q = 0.001 \times \dot{m}_t \text{ corrected ( g/s )} \times \text{LHV* (PROPANE)} = 40,180 \text{ KW}$

$\eta_e^* \text{ (Overall efficiency)} = P_e \text{ ( KW )} / Q \text{ ( KW )} = 0,0007$

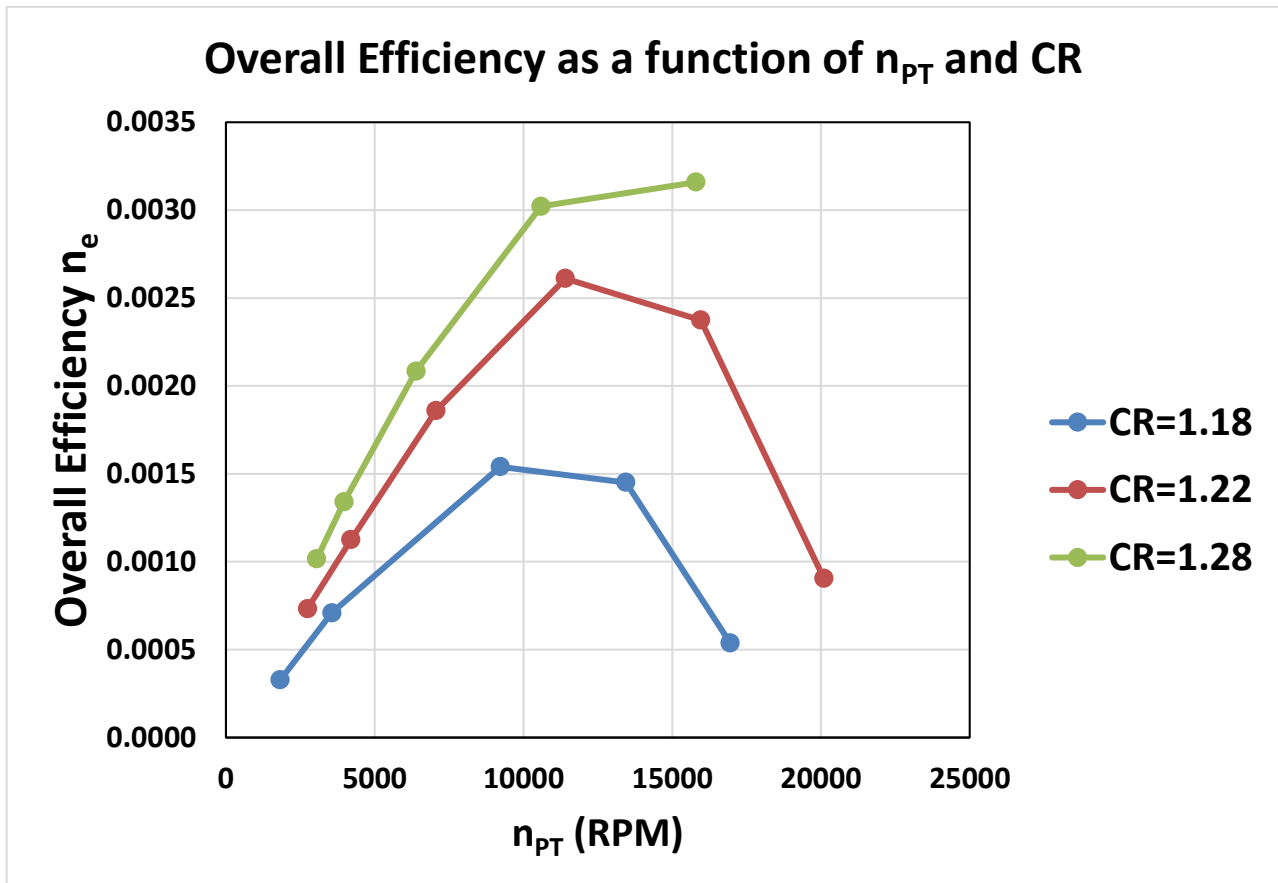
LHV\* ( PROPANE ) = Lower Heating Value 46340 ( KJ/kg )

$\eta_e^* \text{ ( Overall efficiency )} = \text{Συνολικός βαθμός απόδοσης ο οποίος περιλαμβάνει και τις απώλειες της γεννήτριας}$

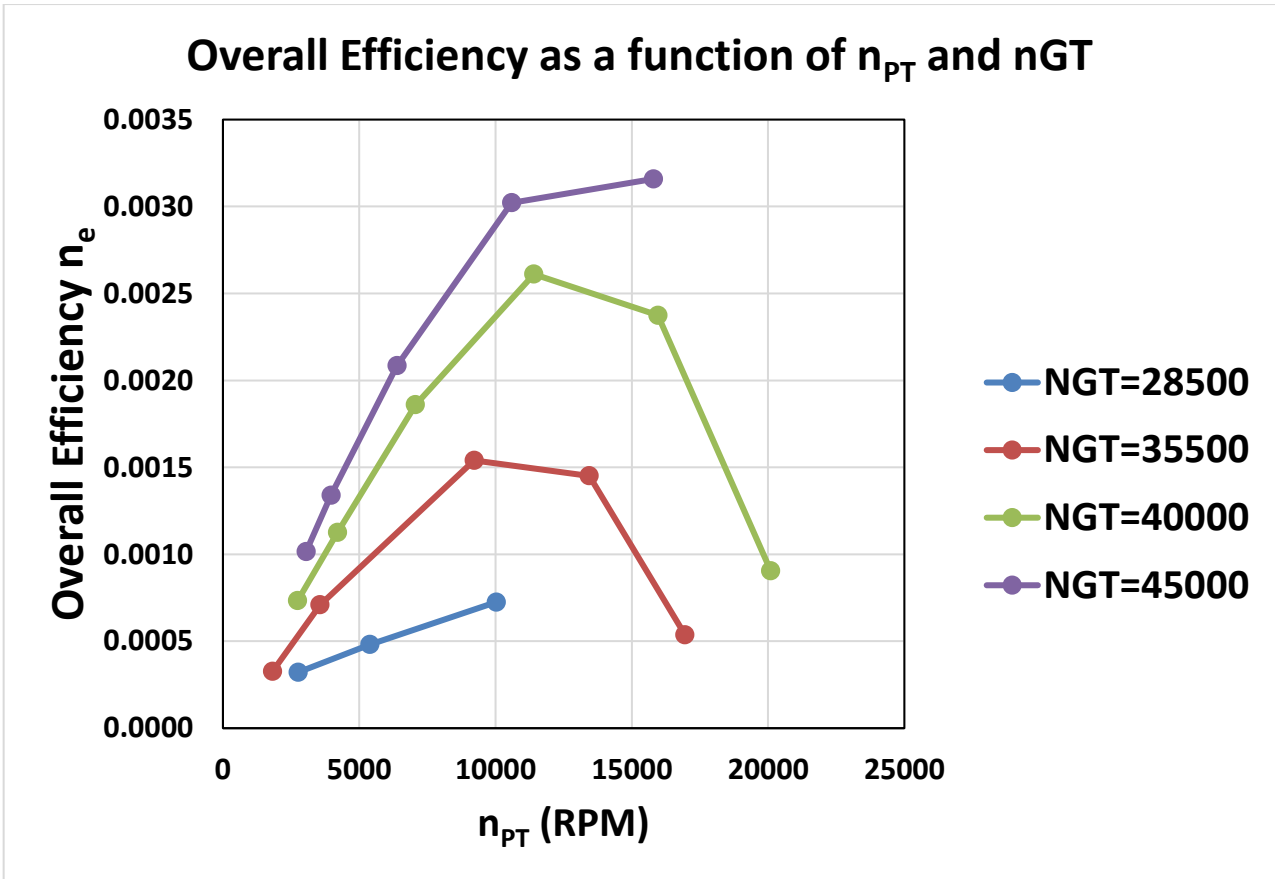
#### 4.5 ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

mt corrected (gr/s)	CR (compression ratio)	Pe (KW)	Q (KW)	$\eta_e$ (Overall efficiency)
0,867	1,180	0,029	40,180	0,0007
0,867	1,180	0,019	40,180	0,0005
0,867	1,180	0,013	40,180	0,0003
1,040	1,180	0,026	48,216	0,0005
1,040	1,180	0,070	48,216	0,0015
1,040	1,180	0,074	48,216	0,0015
1,040	1,180	0,034	48,216	0,0007
1,040	1,180	0,016	48,216	0,0003
1,156	1,220	0,048	53,573	0,0009
1,156	1,220	0,127	53,573	0,0024
1,156	1,220	0,140	53,573	0,0026
1,156	1,220	0,100	53,573	0,0019
1,156	1,220	0,060	53,573	0,0011
1,156	1,220	0,039	53,573	0,0007
1,329	1,280	0,063	61,609	0,0010
1,329	1,280	0,083	61,609	0,0013
1,329	1,280	0,128	61,609	0,0021
1,329	1,280	0,186	61,609	0,0030
1,329	1,280	0,195	61,609	0,0032

#### 4.6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ



Διάγραμμα συντελεστή συνολικής απόδοσης σε συνάρτηση των στροφών του στροβίλου ισχύος στις περιοχές λειτουργίας της μηχανής που ο λόγος συμπίεσης είναι CR=1.18 , CR=1.22 , CR=1.28



Διάγραμμα συντελεστή συνολικής απόδοσης σε συνάρτηση των στροφών του στροβίλου ισχύος, στις περιοχές που ο στρόβιλος υψηλής πίεσης στρέφει με NGT=28500, NGT=35500, NGT= 40000 και NGT=45000 στροφές περίπου.

## ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Οι μετρήσεις που πήραμε από τον επισκευασμένο πλέον εργαστηριακό αεριοστρόβιλο DIDACTA T200 μας δείχνουν τη μεταβολή των στροφών του στροβίλου ισχύος στην εναλλαγή του φορτίου της γεννήτριας από το κουμπί LOAD σε συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας του αεριοστροβίλου. Κρατώντας σταθερές τις στροφές του στροβίλου υψηλής πίεσης και αυξάνοντας το φορτίο παρατηρούμε αύξηση των θερμοκρασιών του αεριοστροβίλου T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub> και μείωση των στροφών του στροβίλου ισχύος και της γεννήτριας με αποτέλεσμα τη μείωση της Τάσης και του Ρεύματος. Για να αυξήσουμε τις στροφές του στροβίλου υψηλής πίεσης στον αεριοστρόβιλο και να πάρουμε μετρήσεις σε άλλο φάσμα στροφών μεταβάλαμε τη στρόφιγγα παροχής του καυσίμου **Mt** η οποία θα αυξηθεί όπως θα αυξηθεί και η πίεση του καυσίμου. Οι μετρήσεις πάρθηκαν σε τέσσερα φάσματα στροφών του στροβίλου υψηλής πίεσης NGT= 28.500, 35.500 , 40.000 , 45000.
- Οι τιμές της απόδοσης του αεριοστροβίλου Didacta T200 D είναι μικρές. Ο συγκεκριμένος αεριοστρόβιλος είναι χαμηλής απόδοσης λόγω της εργαστηριακής χρήσης του. Οι τιμές των διαγραμμάτων απόδοσης του αεριοστροβίλου ταυτίζονται με τις χαρακτηριστικές καμπύλες που υπάρχουν στο εγχειρίδιο χρήσης του κατασκευαστή.
- Γενικά η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας σε θέματα παραγωγής ενέργειας είναι μια πολύ καλή επιλογή, ειδικότερα η χρήση μικροστροβίλου για οικιακή χρήση. Η ποικιλία στη χρήση καυσίμου των μικροστροβίλων δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον και συνεισφέρουν στην οικονομία. Η χρήση καυσίμων από Βιομάζα όπως βιοαέριο και συνθετικό αέριο παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας και στη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές γίνεται συνεχώς πιο επιτακτική, καθώς οι αποδεδειγμένες επιπτώσεις από τη χρήση συμβατικών καυσίμων έχουν καταστρεπτικές συνέπειες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) CHP Industrial Bottoming and Topping Cycle with Energy Information Administration Survey Data  
Paul Otis August 14,2015
- 2) «Οδηγός συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού & θερμότητας» - Κ.Α.Π.Ε.  
Διαθέσιμο στο [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- 3) «Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού – Θερμότητας», 19/11/2008  
Διαθέσιμο στο [www.qualitynet.gr](http://www.qualitynet.gr)
- 4) Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας – Ε.Σ.Σ.Η.Θ.  
[www.hachp.gr](http://www.hachp.gr)
- 5) Καρέκλας Ευάγγελος, Ιωάννης Τριαντάφυλλος, Φρέσκας Γρηγόρης, “ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ” ΥΠΕΠΘ.
- 6) ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ  
Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2012  
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ, ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ & ΨΥΞΗΣ:  
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ
- 7) Biomass Energy  
[www.biomassenergy.gr](http://www.biomassenergy.gr)
- 8) [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- 9) [www.allaboutenergy.gr](http://www.allaboutenergy.gr)
- 10) [www.agroenergy.gr](http://www.agroenergy.gr)
- 11) [www.capstoneturbine.com](http://www.capstoneturbine.com)