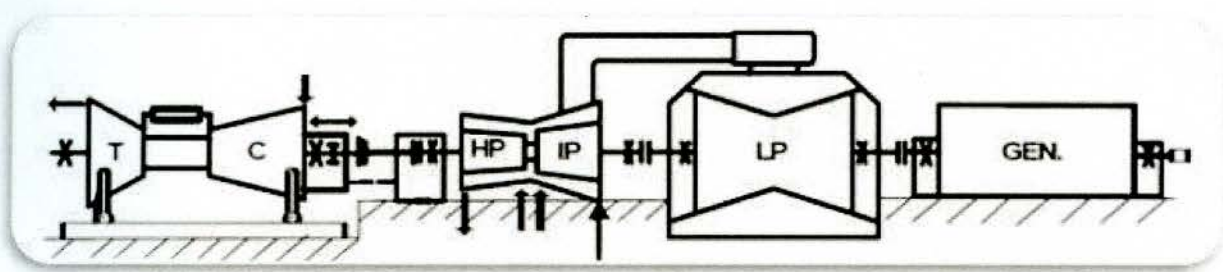




**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

81

**“ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΑΕΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥΣ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ  
400MW ΜΕ ΚΑΥΣΙΜΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ”**



**Επιβλέπων  
Καθηγητής:  
Σπουδαστής:**

Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος Επίκουρος Καθηγητής

Λαμπρακόπουλος Επαμεινώνδας

AM

29785

**Αιγάλεω**

**Ιούνιος - 2011**

Copyright ©

Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτότο έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Ψωμόπουλο Κωνσταντίνο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον θέμα των Σταθμών παραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Επίσης της κα. Αλεξάνδρα Τσιώμη project manager της ΜΕΤΚΑ για τη Μονάδα 5 στο Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου, για τις χρήσιμες συμβουλές της κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που στέκεται πάντα δίπλα μου και με στήριξε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	iii
Περιεχόμενα .....	iv
Λίστα σχημάτων .....	v
Λίστα πινάκων .....	vii
Summary .....	1
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Νέα εποχή στην ενέργεια” .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ενεργειακή κρίση .....	1
1.2 Άρση Μέτρων .....	2
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Αεριοστρόβιλοι” .....</b>	<b>3</b>
2.1 Γενικά .....	3
2.1.1 Ιστορία των Αεριοστρόβιλων .....	3
2.2 Αρχή λειτουργίας Αεριοστρόβιλου .....	7
2.2.1 Κύκλος λειτουργίας Αεριοστρόβιλου (Joule – Brayton).....	7
2.2.1.1 Λειτουργικά στοιχεία ενός Αεριοστρόβιλου .....	10
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Ατμοστρόβιλοι” .....</b>	<b>29</b>
3.1 Γενικά .....	29
3.1.1 Ιστορία των Ατμοστρόβιλων .....	29
3.1.2 Κύκλος Λειτουργίας Ατμοστρόβιλου (Rankine).....	30
3.2 Λειτουργικά στοιχεία ενός Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ).....	33
<b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Συνδυασμένος κύκλος λειτουργίας” .....</b>	<b>49</b>
4.1 Εισαγωγή στο συνδυασμένο κύκλο λειτουργίας.....	49
4.1.1.1 Πλεονέκτημα του συνδυασμένου κύκλου .....	50
4.1.2 Γενικά στοιχεία του συνδυασμένου κύκλου.....	50
4.2 Είδη του συνδυασμένου κύκλου .....	51
<b>5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Μονάδα 5 συνδυασμένου κύκλου εγκατεστημένης ισχύς 370MW” .....</b>	<b>56</b>
5.1.1 Γενικές Πληροφορίες .....	56
5.1.2 Ο ρόλος του Ε.Κ.Η Λαυρίου στο δίκτυο της ΔΕΗ .....	56
5.1.3 Παρουσίαση της Μονάδας 5 .....	57
5.1.4 Περιγραφή της μονάδας .....	57
5.2 Στοιχεία της μονάδας.....	58
5.3 Λειτουργία της μονάδας .....	62
5.3.1 Έναυση του σταθμού.....	63
5.3.2 Πλήρης Λειτουργία .....	63
5.3.3 Σβέση.....	64
5.3.4 Ασφάλεια.....	64
<b>6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Συμπεράσματα” .....</b>	<b>66</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>67</b>
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>68</b>

## Λίστα σχημάτων

Σχήμα 2.1: Η Αιολοπύλη του Ήρωνα πρόδρομος του σημερινού Αεροστρόβιλου .....	3
Σχήμα 2.2: Αεροστρόβιλος κλειστού κύκλου .....	5
Σχήμα 2.3: Η πρώτη επιτυχημένη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .....	6
Σχήμα 2.4: Το Neuchâtel εκθέτεται πια στις εγκαταστάσεις της Alstom στο Birt .....	6
Σχήμα 2.5: Κύκλος Joule – Brayton .....	8
Σχήμα 2.6: Λειτουργικά στοιχεία ενός Αεροστρόβιλου .....	10
Σχήμα 2.7: Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) το στροφέιο, β) ο διαχύτης, γ) η πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής .....	11
Σχήμα 2.8: Αεροστρόβιλος κινητήρας με φυγοκεντρικό συμπιεστή διπλής εισόδου .....	12
Σχήμα 2.9: (Α) Τα κινητά και (Β) τα σταθερά πτερύγια του αξονικού Συμπιεστή .....	13
Σχήμα 2.10: Μείωση δακτυλίου ροής κατά μήκος του αξονικού Συμπιεστή .....	13
Σχήμα 2.11: Μονός αξονικός συμπιεστής (single spool) .....	14
Σχήμα 2.12: Διπλός αξονικός συμπιεστής (double spool compressor) .....	15
Σχήμα 2.13: Συμπιεστής τριπλού άξονα .....	15
Σχήμα 2.14: Στροφέιο φυγοκεντρικού συμπιεστή (α) απλής και (β) διπλής Εισόδου .....	17
Σχήμα 2.15: Φυγοκεντρικός συμπιεστής δύο βαθμίδων .....	17
Σχήμα 2.16: Το διάκενο μεταξύ του στροφείου και του διαχύτη .....	18
Σχήμα 2.17: Στροφέιο αξονικού συμπιεστή .....	19
Σχήμα 2.18: Κινητό πτερύγιο συμπιεστή .....	19
Σχήμα 2.19: Τρόποι συναρμογής κινητών πτερυγίων συμπιεστή .....	20
Σχήμα 2.20: Σταθερά πτερύγια συμπιεστή .....	21
Σχήμα 2.21: Γενική μορφή διαχύτη .....	22
Σχήμα 2.22: Θάλαμος καύσης .....	23
Σχήμα 2.23: Ροές στο θάλαμο καύσης .....	24
Σχήμα 2.24: Άξονας στροβίλου .....	26
Σχήμα 2.25: Στρόβιλος (Gas Turbine) .....	26
Σχήμα 2.26: Ροή καυσαερίων διαμέσου των βαθμίδων του στροβίλου .....	27
Σχήμα 2.27: Εναλλάκτες θερμότητας .....	28
Σχήμα 2.28: Ο αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας .....	28
Σχήμα 3.1: Η εξέλιξη της ατμομηχανή .....	29
Σχήμα 3.2: Ο ατμοστρόβιλος του Parsons (1884) εκθέτεται στο μουσείο Επιστήμων του Λονδίνου .....	30
Σχήμα 3.3: Η υλοποίηση του απλού κύκλου Rankine .....	31
Σχήμα 3.4: Ιδανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση .....	32
Σχήμα 3.5: Υδραυλωτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και υδροθάλαμο τοποθετημένο κατά μήκος .....	34
Σχήμα 3.6: Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς .....	35
Σχήμα 3.7: Αντλία ψυκτικού μέσου .....	39
Σχήμα 3.8: Αντλία ανακυκλοφορίας .....	39
Σχήμα 3.9: Πύργος ψύξης φυσικής λειτουργίας, μονάδα V ΑΗΣ Λαυρίου .....	41
Σχήμα 3.10: Απαεριωτής ανάμειξης με πτώση νερού .....	43
Σχήμα 3.11: Αντικατάσταση πτερυγίων ενός Ατμοστρόβιλου .....	43
Σχήμα 3.12: Βαθμίδες δράσης και αντίδρασης .....	45
Σχήμα 3.13: Θέση ρυθμιστικής βαθμίδας σε σχέση με τον υπόλοιπο ατμοστρόβιλο .....	47
Σχήμα 3.14: Ομάδες ακροφυσίων για ρύθμιση παροχής .....	48

Σχήμα 3.15: Ρύθμιση με παράκαμψη .....	48
Σχήμα 4.1: Μονογραμμικό σχέδιο συνδυασμένου κύκλου .....	50
Σχήμα 4.2: Συνδυασμένος κύκλος μίας πίεσης (αριστερά) και διάγραμμα θερμοκρασίας νερού/ατμού- καυσαερίων (δεξιά).....	51
Σχήμα 4.3: Συνδυασμένος κύκλος μιας πίεσης με προθερμαντικό βρόχο .....	53
Σχήμα 4.4: Συνδυασμένος κύκλος δυο πιέσεων.....	54
Σχήμα 4.5: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων .....	55
Σχήμα 4.6: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση.....	55
Σχήμα 5.1: Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου επί ενός άξονα κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση .....	58
Σχήμα 5.2: Εξωτερική άποψη της μονάδας 5.....	58

## Λίστα πινάκων

Πίνακας 2.1: Κύκλος Joule - Brayton .....	9
Πίνακας 2.2: Επίδραση θερμοκρασίας καύσης και λόγου πίεσης στην απόδοση.....	9
Πίνακας 2.3: Μεταβολές των τιμών πίεσης και ταχύτητας κατά μήκος του συμπιεστή.....	16
Πίνακας 3.4: Σύγκριση στροβίλου δράσης και αντίδρασης .....	44
Πίνακας 5.1: Διάταξη της Μονάδας 5, Ε.Κ.Η. Λαυρίου.....	59
Πίνακας 6.1: Ποσοστιαία ανάλυση φυσικού αερίου.....	62

Σχήμα 3.15: Ρύθμιση με παράκαμψη .....	48
Σχήμα 4.1: Μονογραμμικό σχέδιο συνδυασμένου κύκλου .....	50
Σχήμα 4.2: Συνδυασμένος κύκλος μίας πίεσης (αριστερά) και διάγραμμα θερμοκρασίας νερού/ατμού- καυσαερίων (δεξιά).....	51
Σχήμα 4.3: Συνδυασμένος κύκλος μίας πίεσης με προθερμαντικό βρόχο .....	53
Σχήμα 4.4: Συνδυασμένος κύκλος δυο πιέσεων.....	54
Σχήμα 4.5: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων .....	55
Σχήμα 4.6: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση.....	55
Σχήμα 5.1: Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου επί ενός άξονα κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση .....	58
Σχήμα 5.2: Εξωτερική άποψη της μονάδας 5.....	58



## Summary

The purpose of this work is to present of the gas turbine power plants, as well as an example of a combined cycle power plant fueled by natural gas power at 400 MW installed power.

The first chapter is a flashback for electricity generation over the years and the reason for the use of the combined cycle power plants. In the second chapter presents the gas turbine with a detailed presentation of all parts, followed by an analysis of the operating cycle.

The third chapter focuses on the steam turbine with a detailed presentation of all the parts followed by an analysis of the operating cycle.

In the fourth chapter, a description of the different types of combined cycle power plants (steam and gas turbine - STAG) can be found.

Finally in the fifth chapter details the Unit V, of the Energy Power Center in Lavrion. The station which is a combined cycle power plant on a single axle with three pressure cycles having reheating outputs 370 MW of electric power.

Keywords: combined cycle power plant (ccpp), steam and gas turbine (STAG) gas turbine power plant, Lavrion Energy Power Center.

## Πρόλογος

Ο ηλεκτρικός τομέας ξεκίνα το 1880, κατά την περίοδο της βιομηχανικής επανάσταση με κατ' εξοχήν καύσιμο να είναι οι γαιάνθρακες (κάρβουνο). Ήταν μια επικερδής οικονομική δραστηριότητα με την ανάπτυξη τοπικών συστημάτων παραγωγής, διανομής και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας για τις τοπικές κοινωνίες.

Μετέπειτα, αναπτύχθηκαν τα εθνικά διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα με αποκορύφωση, στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής για οικονομία κλίμακας και τα δίκτυα μεταφοράς, όπου σημαντικό ρόλο είχαν οι εθνικές κυβερνήσεις.

Η έντονα αυξανόμενη ζήτηση στις ανεπτυγμένες οικονομίες ενίσχυσε την ιδέα για την ανάπτυξη ολοένα και μεγαλύτερων κεντρικών σταθμών παραγωγής, υδροηλεκτρικών, θερμικών ή και πυρηνικών. Η ανάγκη για μια πράσινη και φθηνή λύση στην αγορά ενεργείας εξέλιξε τα εργοστάσια παραγωγής ενεργείας με επιτομή την τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου που ευελπιστεί να ξεπεράσει σε απόδοση το 60% τα επόμενα χρόνια.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής είναι να γίνει μία παρουσίαση των αεροστροβιλικών/ατμοστρόβιλων μονάδων παραγωγής ενέργειας, ενώ παράλληλα θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα σταθμού συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο φυσικό αέριο ισχύος 400 MW.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ανάδρομη για την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τους αιώνες και ο λόγος χρησιμοποίησης των σταθμών παραγωγής στο συνδυασμένο κύκλο. Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά τους αεροστρόβιλους με αναλυτική παρουσίαση όλων των μερών του και ακολουθεί ανάλυση του κύκλου λειτουργίας τους. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους ατμοστρόβιλους με αναλυτική παρουσίαση όλων των μερών του ενώ ακολουθεί και ανάλυση του κύκλου λειτουργίας του. Στη συνέχεια στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των διαφόρων τύπων σταθμών παραγωγής συνδυασμένου κύκλου (αεροστρόβιλος, ατμοστρόβιλος).

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η Μονάδα 5 του Ενεργειακού Κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής στο Λαύριο. Η οποία είναι ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου 370 MW, επί ενός άξονα με κύκλο τριών πιέσεων με αναθέρμανση.

Λέξεις κλειδιά: Συνδυασμένος κύκλος, αεροστρόβιλος, ατμοστρόβιλος, Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου.

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## “ΝΕΑ ΕΠΟΧΗ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”

### 1.1 Ενεργειακή κρίση

Πριν από αρκετές δεκαετίες υπήρχε η εντύπωση ότι τα ορυκτά καύσιμα ήταν πρακτικά ανεξάντλητα. Ωστόσο σιγά-σιγά, λόγω της υπερεκμετάλλευσης, φάνηκε ότι με την τρέχουσα ανάπτυξη και αύξηση της ζήτησης ενέργειας, τα αποθέματα των καυσίμων για τις υπάρχουσες τεχνολογίες έχουν έναν πολύ περιορισμένο ορίζοντα εκμετάλλευσης. Εκτιμήσεις που έχουν γίνει για τα ορυκτά καύσιμα, υποδεικνύουν ότι το πετρέλαιο επαρκεί (με σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης) για 50 χρόνια, το φυσικό αέριο για 65 χρόνια και οι γαιάνθρακες για 300 χρόνια χρησιμοποιώντας το σύνολο των αξιοποιήσιμων (τεχνικώς και οικονομικώς) αποθεμάτων.

Η ενεργειακή κρίση όμως της δεκαετίας του '70, η ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη δεκαετία του '80, ο περιορισμός των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων καθώς και η επιρροή των αρχών του νεοφιλελευθερισμού, άρχισαν σταδιακά να αλλάζουν τις στρατηγικές στον ηλεκτρικό τομέα. Αποκεντρωμένες μονάδες με αποδοτικές τεχνολογίες όπως της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (CHP) και μονάδες παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, άρχισαν να εντάσσονται στα ηλεκτρικά δίκτυα για παράλληλη λειτουργία με τους κεντρικούς σταθμούς.

Η αλλαγή του ρυθμιστικού πλαισίου στον ηλεκτρικό τομέα και η σταδιακή απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που άρχισε στη δεκαετία του '90 δημιουργούν μια νέα δυναμική με την είσοδο του 21ου αιώνα. Ο ηλεκτρικός τομέας αποτελεί σήμερα την πιο κρίσιμη υποδομή των σύγχρονων κοινωνιών όπου η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζει άμεσα τη λειτουργία σημαντικών άλλων τεχνολογικών υποδομών. Παράλληλα, οι απαιτήσεις για αδιάλειπτη και υψηλής ποιότητας παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές είναι επιτακτικές.

Μια μακρά και πολύ σημαντική για την οικονομία και την κοινωνία μεταβατική περίοδος στον ηλεκτρικό τομέα έχει αρχίσει. Αυτή χαρακτηρίζεται από νέους κανόνες και κρίσιμες αποφάσεις, νέες επιχειρηματικές προκλήσεις σε ένα ευρύτερο ανταγωνιστικό περιβάλλον και νέες τεχνολογίες με αναγκαίες επενδύσεις και προοπτικές για βιώσιμη ανάπτυξη. Σημαντικές ρυθμιστικές και τεχνολογικές εξελίξεις θα αποτελέσουν τη βάση για τη δημιουργία των νέων ηλεκτρικών συστημάτων αξιόπιστης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ευρώπη, η στρατηγική της Ε.Ε. στην έρευνα χαράσσει το δρόμο για βιώσιμα ηλεκτρικά συστήματα.

Η αποκεντρωμένη παραγωγή καλύπτει μεγάλο εύρος νέων τεχνολογιών με μικρές μονάδες εγκατεστημένες κοντά στην κατανάλωση και θα παίξει σημαντικό ρόλο. Η μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών και άλλων νέων και αποδοτικών τεχνολογιών αποτελεί τη νέα πρόκληση στον ηλεκτρικό τομέα και θα απαιτηθούν ανάλογες επεμβάσεις στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας, αιολικής ενέργειας, βιομάζας, μικρών υδροηλεκτρικών, συμπαραγωγής θερμότητας/ ψύξης, και ηλεκτρικής ενέργειας, κυψελών καυσίμου, συστημάτων αποθήκευσης, τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT), καθώς και άλλων τεχνολογιών συμπεριλαμβάνονται στους μεσοπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους στόχους.

Η διείσδυση και συμμετοχή των αποκεντρωμένων μονάδων στην κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για το 2030 εκτιμάται για το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο 35%- 40%. Αυτό θεωρείται μεγάλη συμβολή στην ασφάλεια και στην αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Παράλληλα με όλα τα παραπάνω η υπερεκμετάλλευση των ενεργειακών πόρων με γνώμονα το κέρδος έχει άμεση επίπτωση στο περιβάλλον. Η συγκέντρωση ισχύος που συμβαίνει σε έναν οποιοδήποτε θερμικό σταθμό παραγωγής ενέργειας, οδηγεί στον σχηματισμό μιας συνεχούς πηγής ρύπων. Ρύπος είναι κάθε ουσία που απελευθερώνεται στο περιβάλλον με ταχύτερο ρυθμό από αυτόν που μπορεί να απορροφηθεί. Επομένως ρύποι μπορεί να είναι αέριοι (όπως διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου), υγροί ή στερεοί (σκόνη, σωματίδια) αλλά μπορεί να είναι ακτινοβολίες, ή έντονοι ήχοι και μεγάλα ποσά θερμότητας.

## 1.2 Άρση Μέτρων

Όλοι αυτοί οι ρύποι υποβαθμίζουν το περιβάλλον, διαταράσσουν οικοσυστήματα, και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων που ζουν ή εργάζονται στην περιοχή. Ειδικά το διοξείδιο του άνθρακα εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο φαίνεται ότι οδηγεί σε αύξηση των θερμοκρασιών χρόνο με τον χρόνο. Επομένως είναι αναγκαίο να τεθούν μέτρα για τον περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι δυο παραπάνω στόχοι που τέθηκαν, δηλαδή εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων και περιορισμός των εκπομπών, έχουν προταθεί πολλά μέτρα

Ανάμεσα σε αυτά είναι και η αύξηση του βαθμού απόδοσης των θερμικών σταθμών με την αναβάθμιση των υπάρχουσών τεχνολογιών και την ανάπτυξη νέων, όπως και θα αναλυθεί στην συνέχεια της εργασίας. Αύξηση του βαθμού απόδοσης σημαίνει ότι με την ίδια ποσότητα καυσίμου θα παράγεται περισσότερη χρήσιμη ενέργεια. Αυτό οδηγεί στην εξοικονόμηση καυσίμου, καθώς περισσότερη ζήτηση θα μπορεί να ικανοποιηθεί, ενώ μπορεί να βοηθήσει στην μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, καθώς οι εκλυόμενοι ρύποι θα μειωθούν ανά KWh παραγόμενης ενέργειας.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ”

#### 2.1 Γενικά

Ο αεριοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή, δηλαδή μια μηχανή η οποία μετατρέπει την θερμότητα που παράγεται από την καύση ενός καυσίμου σε μηχανική ισχύ. Στους αεριοστρόβιλους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ο άξονας του συνδέεται με μια γεννήτρια οπότε η μηχανική ενέργεια που παράγεται μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ.

Ο αεριοστρόβιλος γενικά, σε σχέση με τις άλλες διατάξεις παραγωγής μηχανικού έργου, παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Δεν υπάρχουν πολλά τριβόμενα τμήματα, όπως στις εμβολοφόρες μηχανές, η κατανάλωση λιπαντικού είναι μικρή και έχουν ελάχιστα προβλήματα ζυγοσταθμίσεως, πράγμα που τους κάνει να παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία.

#### 2.1.1 Ιστορία των Αεριοστρόβιλων

Η πρώτη εφαρμογή αερίωσης αποδίδεται στον Έλληνα επιστήμονα Ήρωνα που έζησε στην Αλεξάνδρεια τον 1ο αιώνα μ.Χ. Η μηχανή που κατασκεύασε (Αιολοπέλη) θεωρείται πρόδρομος των αεριοστρόβιλων κινήτων.



*Σχήμα 2.1: Η Αιολοπέλη του Ήρωνα πρόδρομος του σημερινού Αεριοστρόβιλου*

Ένα κλειστό δοχείο με νερό θερμαινόταν ώστε να παραχθεί ατμός. Αυτός μεταφερόταν μέσω δύο κάθετων σωλήνων σε μία σφαίρα, η οποία έφερε αυλούς στη διεύθυνση της ακτίνας της. Καθώς η σφαίρα γέμιζε με ατμό, περιστρέφονταν και ο ατμός εύρισκε οδό διαφυγής από τους ακτινικούς αυλούς.

Στην Κίνα, τον 8ο αιώνα μ. Χ. χρησιμοποιούσαν βεγγαλικά, η λειτουργία των οποίων στηρίζεται στο γνωστό ως τρίτο νόμο του Νεύτωνα: «σε κάθε δράση αντιστοιχεί μία ίση και αντίθετη, σε φορά, αντίδραση». Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι αεριοστρόβιλοι εφαρμόζουν αυτήν ακριβώς την αρχή κατά τη λειτουργία τους. Το 1232, στην Κίνα χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ένα όπλο που ονομάζοταν «Βέλος του ιπτάμενου πυρός» που προωθούταν με πυρίτιδα.

Το 1505 μ.Χ. ο Ιταλός Leonardo Da Vinci σχεδίασε μία μηχανή η οποία χρησιμοποιήθηκε αργότερα για το ψήσιμο φαγητού μέσα σε καμίνι. Το 1629, ο Ιταλός μηχανικός Giovanni Branca σχεδίασε τον πρώτο, ουσιαστικά, στρόβιλο. Ατμός, παραγόμενος σε θερμαινόμενο δοχείο, περιέστρεφε δίσκο που έφερε κοιλότητες στην περιφέρειά του. Η περιστροφή του δίσκου μεταφερόταν μέσω συστήματος γραναζιών σε άλλον άξονα. Το σύστημα βρήκε εφαρμογή σε μύλο ελαιολιτριβείου

Ο Ισαάκ Νεύτων, βασισμένος στον τρίτο νόμο του, σχεδίασε το 1687 ένα όχημα το οποίο κινούνταν με ώθηση παραγόμενη από ατμό. Το μειονέκτημα ήταν ότι το όχημα διέθετε πολύ μικρή ισχύ. Ο σχεδιασμός παρόμοιου οχήματος χρεώνεται και στον Ολλανδό Willem Jako Gravesande. Το 1791, ο Άγγλος John Barber σχεδίασε ένα σύστημα το οποίο λειτουργούσε με το θερμοδυναμικό κύκλο του σύγχρονου αεριοστρόβιλου κινητήρα. Το 1808, ο Άγγλος John Bumbell κατασκεύασε έναν αεριοστρόβιλο παρόμοιο με τους σημερινούς, μα χωρίς σταθερά πτερύγια. Αρκετές ομοιότητες με τους αεριοστρόβιλους της εποχής μας παρουσίαζε και ο κινητήρας που κατασκεύασε το 1837 ο Γάλλος Bresson.

Το 1850, ο Fernihough επινόησε τον πρώτο αεριοστρόβιλο κινητήρα που είχε τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί ως εργαζόμενα μέσα ατμό ή αέρα. Η σύλληψη μιας μηχανής με τη μορφή που την γνωρίζουμε σήμερα έγινε αργότερα. Διατάξεις αεριοστρόβιλων ανοικτού κυκλώματος πρότειναν οι Franz Stolze (Γερμανία, 1872) και Charles Parsons (Μ. Βρετανία 1884).

Στην Αμερική το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας δόθηκε στον Charles Curtis το 1895. Τα πλεονεκτήματα του στρόβιλου βεβαία φάνηκαν όταν χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αεριοστρόβιλοι που παρήγαγαν μηχανική ισχύ κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά στις αρχές του 20ου αιώνα από την ελβετική εταιρία BROWN-BOVERI&CIE μετέπειτα ABB, σε συνεργασία με τον Γάλλο καθηγητή Rateau, έναν από τους πρωτοπόρους στην κατασκευή στρόβιλομηχανών. Η πρώτη μονάδα που λειτούργησε ήταν στο Neuchatel της Ελβετίας, το 1939, σαν μονάδα αιχμής με εγκατεστημένη ισχύς 4 MW και απόδοση 17,4%.

Επειδή υπάρχουν απώλειες, το έργο που λαμβάνεται τελικά στην έξοδο του στρόβιλου είναι μικρότερο. Το ωφέλιμο έργο αυξάνεται με την προσθήκη επιπλέον καυσίμου, αν και υπάρχει ένα όριο του λόγου καυσίμου/αέρα, για δεδομένη παροχή αέρα, που περιορίζει το ποσό του ωφέλιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου καυσίμου/αέρα καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των πτερυγίων του στρόβιλου, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή. Αυτή καθορίζεται από την αντοχή σε ερπυσμό των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή και από την επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστρόβιλου. Συνεπώς οι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων είναι:

- η απόδοση κάθε τμήματος (στρόβιλος, συμπιεστής, καυστήρας, εναλλάκτης κλπ.)
- η θερμοκρασία λειτουργίας (που εξαρτάται από τα χρησιμοποιούμενα υλικά)

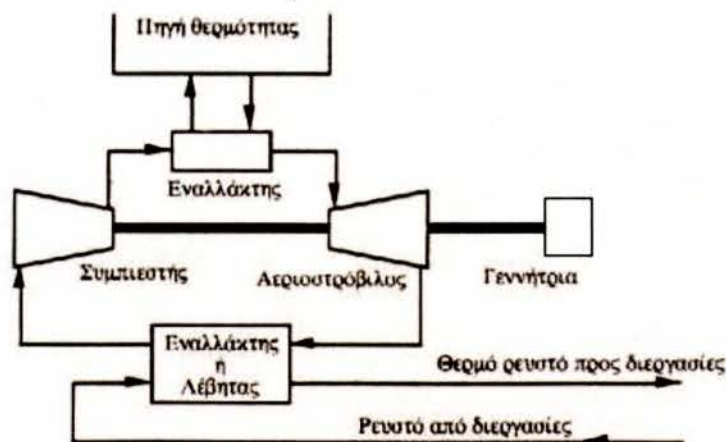
Η ολική απόδοση του κύκλου ενός αεριοστρόβιλου εξαρτάται και από το λόγο συμπίεσεως του συμπιεστή. Αρχικά υπήρχαν δυσκολίες στην πραγματοποίηση υψηλού λόγου συμπίεσεως, όμως σήμερα, ιδιαίτερα σε τελειοποιημένους κινητήρες, επιτυγχάνονται λόγοι συμπίεσεως πάνω από 30:1, με απόδοση συμπιεστή 85-90% και με θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο πάνω από 1200-1500°K.

Παλαιότερα είχαν προταθεί δύο δυνατά συστήματα καύσεως. Το ένα υπό σταθερό όγκο και το άλλο υπό σταθερή πίεση. Θεωρητικά η θερμική απόδοση του κύκλου υπό σταθερό όγκο είναι μεγαλύτερη αυτού υπό σταθερή πίεση, αλλά οι μηχανικές δυσκολίες είναι πολύ μεγαλύτερες που σχεδόν

αποκλείουν την εξέλιξη αεριοστρόβιλου με κύκλο υπό σταθερό όγκο. Οι διαδικασίες συμπίεση-καύση-εκτόνωση στον αεριοστρόβιλο δε γίνονται στην ίδια μονάδα όπως στους παλινδρομικούς κινητήρες.

Οι διαδικασίες γίνονται σε ξεχωριστές μονάδες, που λέγονται στοιχεία του κινητήρα, και οι οποίες χωρίζονται με την έννοια ότι σχεδιάζονται χωριστά. Τα στοιχεία αυτά όμως συνδέονται λειτουργικά μεταξύ τους και σχηματίζουν τον αεριοστρόβιλο. Είναι δυνατόν να προστεθούν ψύκτες μεταξύ των συμπιεστών, αναθερμαντικοί θάλαμοι καύσης μεταξύ των στρόβιλων καθώς και αναγεννητές θερμότητας μεταξύ του συμπιεστή και του θαλάμου καύσης που αξιοποιούν τα καυσαέρια που εξέρχονται από το στρόβιλο για να θερμάνουν τον αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσεως. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται για την αύξηση της εξερχόμενης ισχύος και αποδόσεως. Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού εξαρτάται από την ειδική περίπτωση εφαρμογής του αεριοστρόβιλου.

Εκτός από τους διάφορους απλούς κύκλους, που προκύπτουν με την προσθήκη των βοηθητικών στοιχείων όπως είναι οι ψύκτες, οι αναθερμαντήρες και οι εναλλάκτες, οι αεριοστρόβιλοι κατατάσσονται σε δύο διακεκριμένες κατηγορίες: ανοικτού και κλειστού κύκλου. Στους αεριοστρόβιλους ανοικτού κύκλου (Σχ.2.2), πραγματοποιείται συνεχής εισροή ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο συμπίεστή και η ενέργεια προστίθεται με την καύση ενός καυσίμου εντός του αέρα. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο και εξέρχονται στην ατμόσφαιρα.



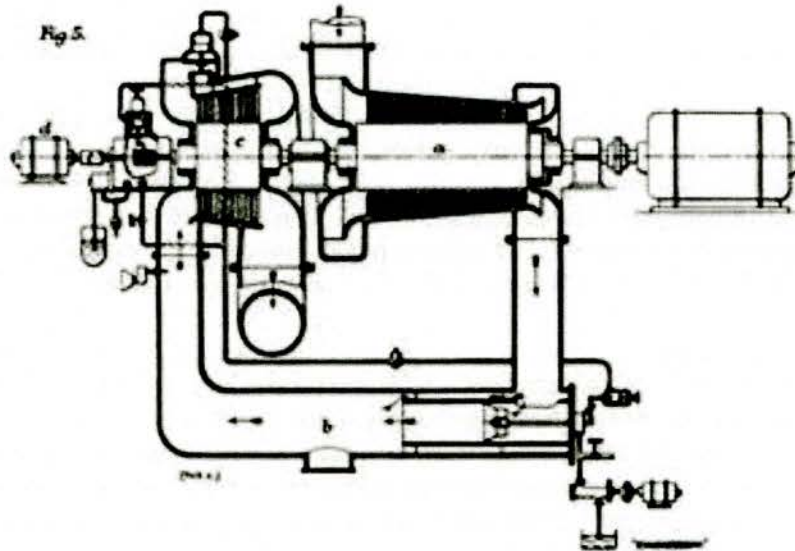
Σχήμα 2.2: Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου

Στους αεριοστρόβιλους κλειστού κύκλου ένα αέριο ή ο αέρας ανακυκλώνεται συνεχώς μέσα στη μηχανή. Είναι φανερό ότι η καύση δεν λαμβάνει χώρα εντός του αερίου του κυκλώματος και η απαιτούμενη ενέργεια πρέπει να δοθεί από ένα θερμαντήρα (εναλλάκτη), ενώ η καύση λαμβάνει χώρα σ' ένα χωριστό κύκλωμα. Ο κλειστός κύκλος λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου μοιάζει με εκείνον του ατμοστρόβιλου.

JAN. 5. 1940.

ENGINEERING.

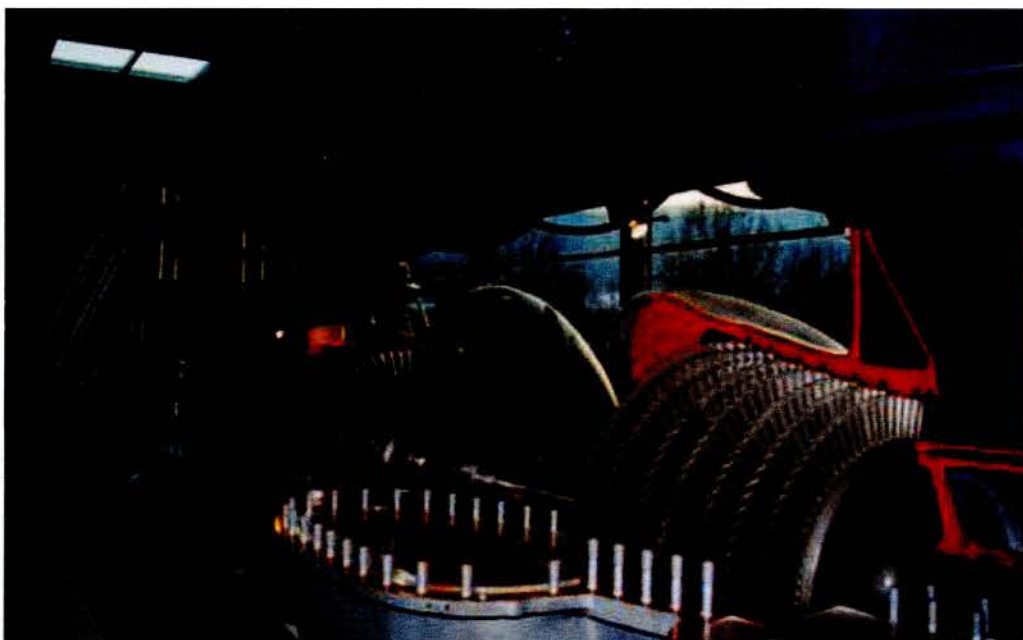
TESTS OF 4,000-KW. GAS-TURBINE SET.



*Σχήμα 2.3: Η πρώτη επιτυχημένη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας*

Το αεριοστρόβιλο εργοστάσιο φυσικού αερίου του Neuchatel θεωρείται ως η πρώτη επιτυχημένη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του είδους του. Αξιοσημείωτο είναι ότι μέχρι τη 18η Αυγούστου του 2002 το εργοστάσιο διατηρούνταν ακόμα σε κατάσταση λειτουργίας, όταν έπαυσε οριστικά την λειτουργία του εξαιτίας μιας κατεστραμμένης γεννήτριας. Ιστορικά είχε 1.908 εκκινήσεις και 63 χρόνια συνολικής υπηρεσίας στο δίκτυο. Το 1988, το ASME International (American Society of Mechanical Engineers) ονόμασε το εργοστάσιο του Neuchâtel ως το «ιστορικότερο ορόσημο των Μηχανολόγων Μηχανικών»

Μετά τον παροπλισμό του εργοστασίου, η Alstom απέκτησε το εργοστάσιο το 2005. Το ανακατασκεύασε πλήρως και τώρα βρίσκεται σαν έκθεμα στις κεντρικές εγκαταστάσεις της Alstom στο Birr.



*Σχήμα 2.4: Το Neuchâtel εκθέτεται πια στις εγκαταστάσεις της Alstom στο Birr*



Όμως έως τις αρχές της δεκαετίας του 1960 δεν υπήρξε σημαντικό ενδιαφέρον για αυτή τη τεχνολογία. Από το 1965 και έπειτα το ενδιαφέρον των Αμερικανών αναθερμαίνεται. Αφορμή είναι μια σειρά από γεγονότα, όπως οι συνεχόμενες διακοπές ρεύματος στις βόρειο - ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες που συνέβησαν το 1965, επισημάνθηκε η ανάγκη για την κατασκευή ενός εργοστασίου που θα μπορούσε να ξεκινήσει χωρίς εξωτερική ενεργεία. Άλλοι παράγοντες ήταν οι καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση των πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και οι απότομες αύξησημειώσεις (peak) του φορτίου που οφείλονταν κυρίως στη χρήση του κλιματιστικού.

Η αργοπορία στην εξέλιξη των στροβίλων οφείλεται, γιατί ο τρόπος λειτουργίας των τελευταίων βρίσκεται πιο κοντά στην φυσική αντίληψη του ανθρώπου για τις δυνάμεις που ασκούνται από ρευστά σε στερεά σώματα. Η μακροσκοπική περιγραφή και ο έλεγχος των δυνάμεων που ασκούνται στις εμβολοφόρες μηχανές είναι δυνατόν να προσεγγιστεί ευκολότερα απ'ότι στις αντίστοιχες δυνάμεις των πτερυγίων στροβιλομηχανών.

Αυτό γιατί οι δυνάμεις στα πτερύγια στροβιλομηχανής αναπτύσσονται μέσω της αντίστοιχης μορφής των πεδίων ροής του ρευστού που τα διασχίζει και επομένως η κατανόηση και η περιγραφή τους απαιτεί εξελιγμένες γνώσεις για την ροή των ρευστών. Η εφεύρεση της μηχανής αυτού του τύπου έγινε μόλις το 1930, ωστόσο οι πρώτοι αεριοστρόβιλοι μόλις που μπορούσαν να συντηρήσουν την περιστροφή τους καθώς είχαν θερμικούς βαθμούς απόδοσης 2-4%. Μόνο όταν έγινε κατανοητή η φυσική της ροής του αερίου μέσα από την μηχανή και ιδιαίτερα τις πτερυγώσεις έγινε δυνατή η σχεδίαση αεριοστρόβιλων με αποδεκτές επιδόσεις.

## 2.2 Αρχή λειτουργίας Αεριοστρόβιλου

Για τη λειτουργία του αεριοστρόβιλου χρειάζεται αέριο υψηλής πίεσεως το οποίο εκτονούμενο μέσα στο στρόβιλο τον κινεί. Ο απαιτούμενος υψηλός λόγος πίεσεως πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση του συμπιεστή. Εάν δεν υπήρχαν απώλειες, στο σύστημα συμπιεστής – στρόβιλος, τότε το αποδιδόμενο έργο από τον στρόβιλο θα ήταν ίσο προς το καταναλισκόμενο από τον συμπιεστή. Αλλά και σ' αυτή την ιδανική κατάσταση δε θα μπορούσε να παραχθεί ωφέλιμο έργο και το αποτέλεσμα θα ήταν απλώς η λειτουργία του συστήματος συμπιεστής-στρόβιλος.

Το έργο που παράγει ο στρόβιλος αυξάνεται με την πρόσθεση ενέργειας στο εκτονούμενο αέριο που αυξάνει τη θερμοκρασία του. Όταν το αέριο είναι ο αέρας, η πρόσθεση ενέργειας πραγματοποιείται με την καύση ενός καύσιμου με τον αέρα που έχει προηγουμένα συμπιεστεί. Τα καυσαέρια εκτονούμενα παράγουν στο στρόβιλο έργο, μέρος του οποίου κινεί τον συμπιεστή, ενώ ταυτόχρονα παράγεται και ωφέλιμο έργο. Η διαδικασία αυτή παραγωγής ωφέλιμου έργου είναι η αρχή λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου (Σχ. 5).

### 2.2.1 Κύκλος λειτουργίας Αεριοστρόβιλου (Joule – Brayton)

Οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν με βάση τον κύκλο Joule - Brayton Αποδεικνύεται ότι για τον ιδανικό κύκλο Brayton η θερμική απόδοση της μηχανής  $n_{th}$ , δίνεται από τη σχέση:

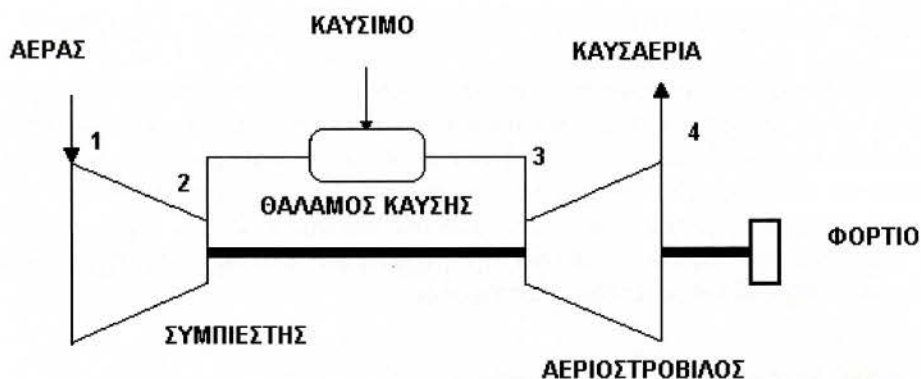
$$n_{th} = 1 - \left( \frac{1}{r} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Όπου  $r$  είναι ο λόγος πιέσεων  $P2/P1 = P3/P4$ . Είναι φανερό ότι η απόδοση εξαρτάται από τον λόγο πιέσεων και το  $\gamma (=Cp/Cv)$  του αερίου. Επιπλέον, το ειδικό έργο (Specific Work,  $W/CpT1$ ) εξαρτάται και από την μέγιστη θερμοκρασία, είναι δε μέγιστο όταν ο λόγος πιέσεων παίρνει τέτοια τιμή έτσι ώστε, οι θερμοκρασίες εξόδου του συμπιεστή και του στρόβιλου να είναι ίδιες. Επομένως, για δεδομένη θερμοκρασία εισόδου στρόβιλου (Τ1Τ) ο λόγος πιέσεων για μέγιστο ειδικό έργο είναι

διαφορετικός, χαμηλότερος, απ' αυτόν που απαιτείται για μέγιστη απόδοση. Επομένως, ο σχεδιαστής πρέπει να αποφασίσει αν χρειάζεται μικρή μηχανή (υψηλό ειδικό έργο) ή αποδοτική μηχανή (χαμηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου).

Ένας απλός αεριοστρόβιλος αποτελείται από τρία τμήματα:

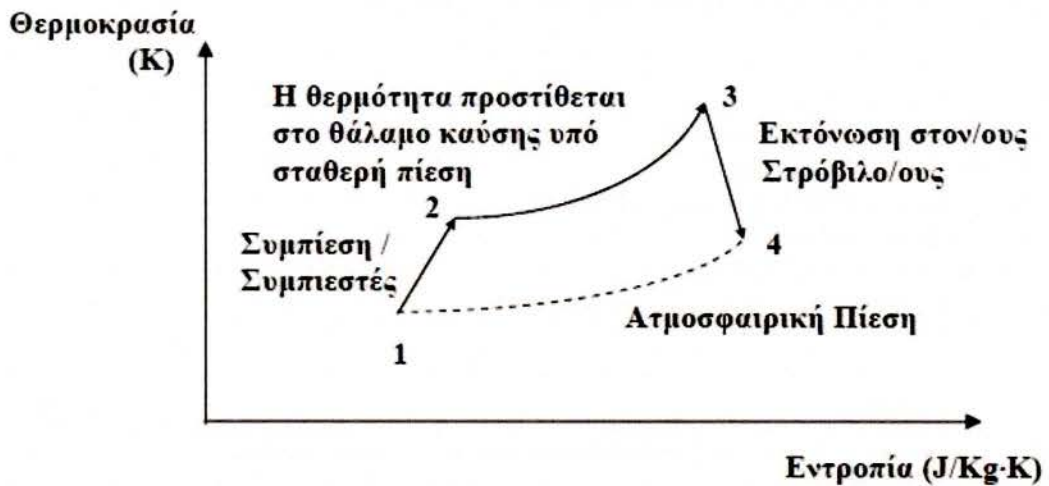
- τον συμπιεστή (compressor)
- τον θάλαμο καύσης (combustor)
- τον στρόβιλο (turbine)



Σχήμα 2.5: Κύκλος Joule – Brayton

Οι διεργασίες που συμβαίνουν στον απλό ιδεατό κύκλο Joule- Brayton είναι οι ακόλουθες: Ο αέρας του εξωτερικού περιβάλλοντος αναρροφάται στο συμπιεστή, όπου και συμπιέζεται (1-2), μετά οδηγείται στο θάλαμο καύσης, όπου αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται (2-3) και, τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο, όπου και εκτονώνονται μέχρι την τελική πίεση που είναι η ατμοσφαιρική (3-4). Η μεταβολή (4-1), που είναι ισόθλιπη αποβολή θερμότητας γίνεται μόνο στους αεριοστρόβιλους κλειστού κυκλώματος.

Η παραπάνω αρίθμηση μπορεί να γίνει θεωρώντας 0 την ατμόσφαιρα, 1 την είσοδο του αγωγού εισόδου, 2 την είσοδο του συμπιεστή και 3 την έξοδό του και παράλληλα είσοδο στον θάλαμο καύσης, 4 έξοδο από τον θάλαμο καύσης και είσοδο στον στρόβιλο και 5 έξοδο στρόβιλου, ενώ 6 έξοδο της μηχανής, οπότε ο κύκλος θα είναι 2-3 η συμπίεση, 3-4 η καύση και 4-5 η εκτόνωση. Στον απλό κύκλο θεωρείται ότι τόσο η συμπίεση όσο και η εκτόνωση είναι ισεντροπικές και η καύση είναι ισόθλιπη. Ωστόσο στην πραγματικότητα επειδή δεν υφίστανται μεταβολές χωρίς απώλειες η απόδοση ενός πραγματικού κύκλου είναι μικρότερη. Έτσι στον πραγματικό κύκλο έχουμε αδιαβατική συμπίεση, πρόσδοση θερμότητας σε, περίπου, σταθερή πίεση και αδιαβατική εκτόνωση.



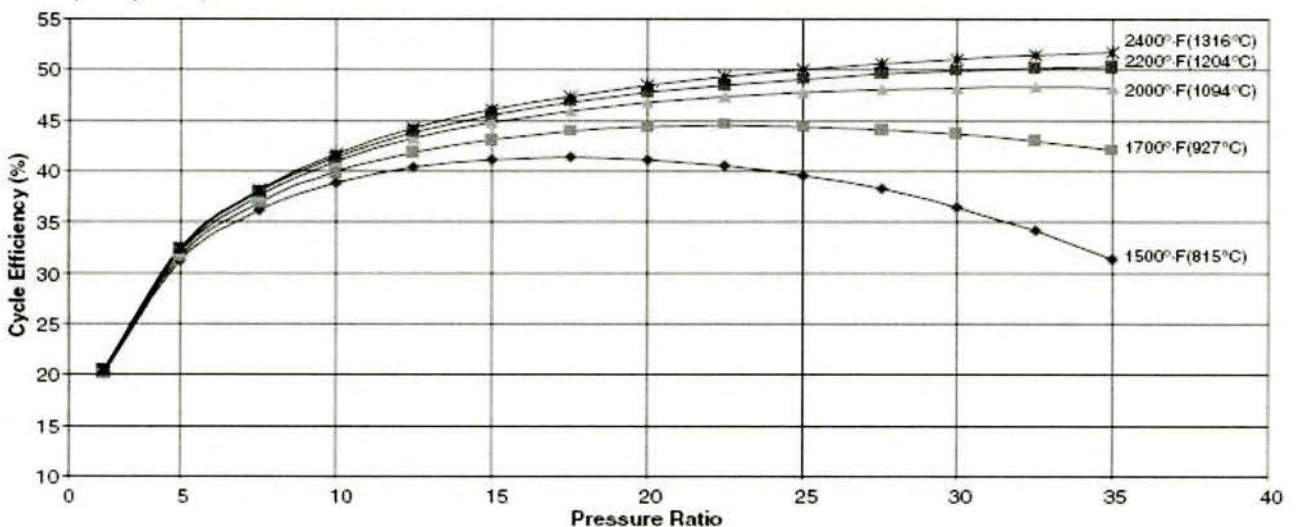
Πίνακας2.1: Κύκλος Joule - Brayton

### Κύκλος Brayton

Ο βαθμός απόδοσης του απλού κύκλου εξαρτάται άμεσα από την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, που αυτή είναι η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στο στρόβιλο. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυτή, τόσο αυξάνεται και η απόδοση και η συγκέντρωση ισχύος. Ωστόσο υπάρχει περιορισμός που τίθεται από τα υλικά του στροβίλου λόγω αντοχής στις συνεχείς υψηλές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά την σχέση λόγου πίεσης και βαθμού απόδοσης, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος πίεσης που εξαρτάται από τις θερμοκρασίες εισόδου συμπίεστη και στροβίλου και το βαθμό απόδοσής τους. Περαιτέρω αύξηση του λόγου πίεσης οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης, εάν δεν χρησιμοποιηθεί ενδιάμεση ψύξη στο συμπίεστη. Αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου οδηγεί σε μετατόπιση αυτού του βέλτιστου σημείου σε μεγαλύτερους λόγους πίεσης.

Μεγάλοι λόγοι πίεσης όμως καθιστούν το συμπίεστη ευαίσθητο σε μεταβολές φορτίου, περιορίζοντας την περιοχή λειτουργίας του με καλή απόδοση, ενώ ενδέχεται να προκληθούν φαινόμενα πάλμωσης (surge) που μπορεί να καταστρέψουν τον συμπίεστη. Τυπικοί βαθμοί απόδοσης σύγχρονων αεριοστροβίλων είναι από 28-40%+ (οι μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης συναντώνται σε παράγωγους αεροπορικών).

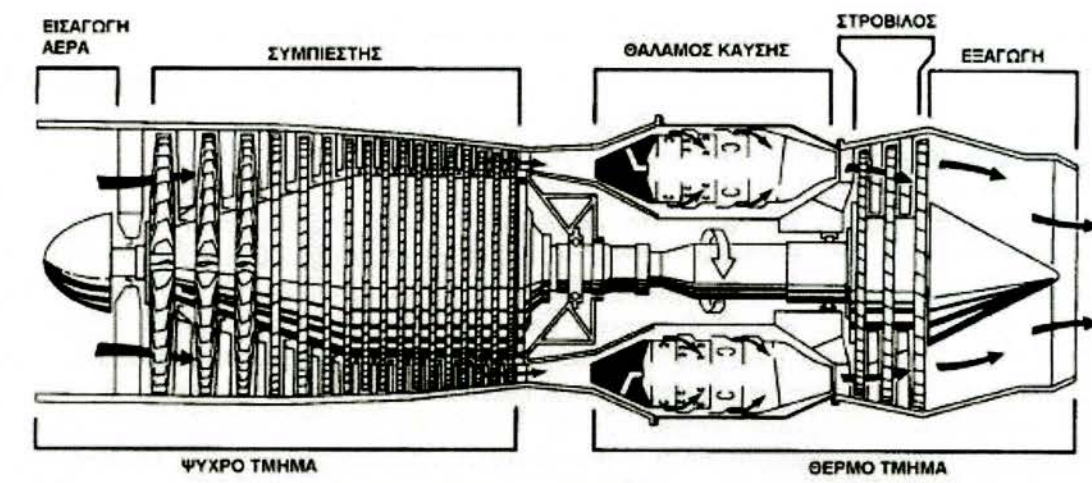


Πίνακας2.2: Επίδραση θερμοκρασίας καύσης και λόγου πίεσης στην απόδοση

### 2.2.1.1 Λειτουργικά στοιχεία ενός Αεριοστρόβιλου

Τα λειτουργικά στοιχεία του συστήματος είναι:

- (α) Το τμήμα εισαγωγής (intake)
- (β) Ο συμπιεστής (compressor)
- (γ) Ο θάλαμος καύσης (combustion chamber)
- (δ) Ο στρόβιλος (turbine)
- (ε) Το τμήμα εξαγωγής (nozzle)
- (στ) Οι εναλλάκτες θερμότητας (heat exchanger)



Σχήμα 2.6: Λειτουργικά στοιχεία ενός Αεριοστρόβιλου

#### α) Τμήμα εισαγωγής

Προσαρμόζει τον αέρα που εισέρχεται στη μηχανή στις απαιτήσεις του συμπιεστή σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Οι πιο βασικές απαιτήσεις είναι καθαρός (από σωματίδια) αέρας, ομοιόμορφης κατανομής σε ταχύτητα και πίεση και στον κατάλληλο αριθμό Mach για αεροπορικές εφαρμογές. Μερικές φορές περιλαμβάνει και φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων ή απορρόφησης ηχητικών κυμάτων.

Η εισαγωγή του αέρα, πραγματοποιείται από ειδικό αεραγωγό εισαγωγής (air inlet duct), σκοπός του αεραγωγού είναι να κατευθύνει το ρεύμα του εισερχόμενου αέρα προς το συμπιεστή με τις λιγότερες δυνατές απώλειες, λόγω τριβών και στροβιλισμών, και με ομοιόμορφη ροή. Ο σκοπός αυτός πρέπει να επιτυγχάνεται σε όλες τις ταχύτητες και καταστάσεις λειτουργίας. Στο τελευταίο τμήμα του αεραγωγού, ακριβώς μπροστά από το συμπιεστή, η ροή πρέπει να επιβραδυνθεί ώστε να αυξηθεί η στατική της πίεση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάκτηση πίεσης (ram recovery).

Για το λόγο αυτό, η διατομή του αεραγωγού αυξάνεται κατά μήκος του τμήματος αυτού. Σε ορισμένες εισαγωγές τοποθετούνται οδηγία πτερύγια (Inlet Guide Vanes - IGV) ώστε να ομαλοποιείται η ροή του εισερχόμενου ρεύματος αέρα πριν την είσοδό του στο συμπιεστή. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας (Variable geometry Guide Vanes – VGV).

#### β) Συμπιεστής

Το εξάρτημα που παροχετεύει τις κατάλληλες ποσότητες αέρα στον κινητήρα είναι ο συμπιεστής. Βρίσκεται ακριβώς μετά τον αεραγωγό εισαγωγής, από τον οποίο και παραλαμβάνει τον εισερχόμενο αέρα. Μπορεί να είναι είτε φυγοκεντρικός (Σχήμα 8), είτε αξονικός (Σχήμα 13), είτε παλινδρομικός. Συνήθως προτιμούνται οι δύο πρώτοι τύποι, γιατί εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση, είναι πιο

συμπαγείς και πιο φθηνοί. Επιτρέπουν την αναρρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ατμοσφαιρικού αέρα ( $\approx 150 \text{ kg/s/m}^2$  διατομής του αγωγού εισόδου σε αριθμό Mach  $\approx 0.4$ ).

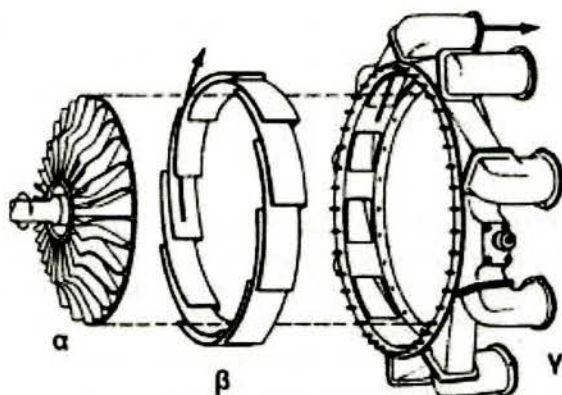
Η λειτουργία του συμπιεστή έχει άμεση επίδραση στη συνολική απόδοση του κινητήρα. Η εργασία που επιτελεί είναι να συμπιέζει τον εισερχόμενο αέρα ώστε κατά την έξοδό του από το συμπιεστή να έχει αποκτήσει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα. Με τον τρόπο αυτόν, η παραγόμενη ώση θα είναι μεγάλη αφού ο κινητήρας θα μπορεί να χειρίζεται πάρα πολύ μεγάλες ποσότητες αέρα, σε σύγκριση με το μικρό όγκο του. Στις μέρες μας, οι συμπιεστές έχουν λόγο συμπίεσης έως και 30:1 ενώ οι ταχύτητες του αέρα κατά τη συμπίεση φτάνουν τα 150-200m/sec. Εκτός από το έργο της συμπίεσης του εισερχόμενου αέρα, το τμήμα του συμπιεστή επιτελεί και στην παροχή αέρα για την ψύξη του τμήματος του στροβίλου. Η ποσότητα του αέρα που συμπιέζεται καθώς και η αύξηση της πίεσης εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Όσο αυτή αυξάνεται, επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη συμπίεση. Βέβαια, η αύξηση της πίεσης εξαρτάται και από τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Όταν αυτή λαμβάνει χαμηλές τιμές, τότε η συμπίεση είναι μεγαλύτερη. Οι τύποι των συμπιεστών που χρησιμοποιούνται στους αεριοστροβίλους κινητήρες είναι:

- φυγοκεντρικής ροής,
- αξονικής ροής, και
- φυγοκεντρικής – αξονικής ροής.

Ο κάθε τύπος λαμβάνει το όνομά του σύμφωνα με τη διεύθυνση της ροής του αέρα μέσα στο συμπιεστή. Ο τελευταίος τύπος αποτελεί συνδυασμό των δύο άλλων και συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τους.

### β1) Φυγοκεντρικοί συμπιεστές

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής (centrifugal compressor), ή συμπιεστής φυγοκεντρικής ροής, χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους κινητήρες αερίωθησης. Αποτελείται από τρία μέρη: τον περυγιοφόρο δίσκο (στροφέιο ή ρότορας, impeller), το διαχύτη (diffuser) και, σε ορισμένες περιπτώσεις, την πολλαπλή σωλήνωση (manifold) εξαγωγής του συμπιεσμένου αέρα στο επόμενο τμήμα του κινητήρα.

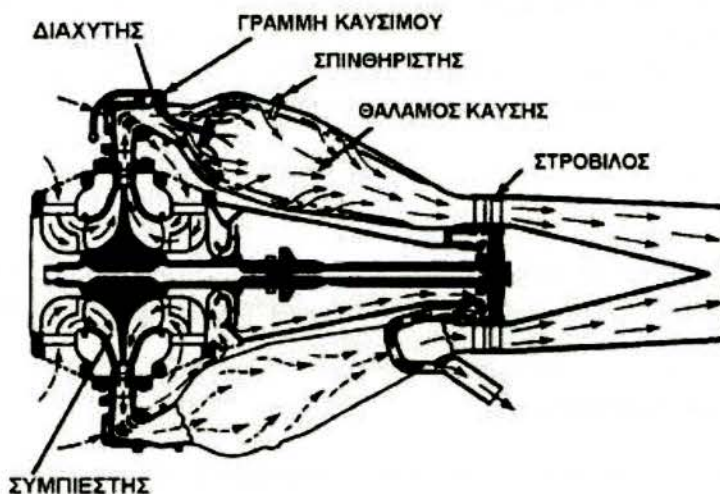


Σχήμα 2.7: Τα μέρη του φυγοκεντρικού συμπιεστή: α) το στροφέιο, β) ο διαχύτης, γ) η πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής

Το στροφέιο φέρει πτερύγια (blades) που βρίσκονται στη μπροστινή ή και στις δύο πλευρές του. Με την περιστροφή του, η οποία πραγματοποιείται από το στροβίλο μέσω του κοινού άξονα, δημιουργείται υποπίεση στην περιοχή γύρω από τον άξονα και αναρροφάται ο εισερχόμενος αέρας. Οι επικρατούσες φυγόκεντρες δυνάμεις ωθούν τον αέρα κατά την ακτινική διεύθυνση (κατά το μήκος των πτερυγίων) προς την εξωτερική περιφέρεια του στροφείου. Με αυτήν την κίνηση επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ταχύτητας του αέρα και μικρή αύξηση στην (στατική) πίεση, λόγω της διόδου από τα πτερύγια του στροφείου.

Καθώς αφήνει το στροφέιο, ο αέρας εισέρχεται στους διαχύτες. Εκεί, η αύξηση της διατομής μετατρέπει την υψηλή ταχύτητα (και υψηλή κινητική ενέργεια) σε χαμηλή (και υψηλή ενέργεια πίεσης), δηλαδή σε αύξηση της στατικής πίεσης. Στη συνέχεια, ο αέρας εισέρχεται στην πολλαπλή σωλήνωση που λειτουργεί ως μέσο παραλαβής και διάθεσης του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης. Αυτή είναι, συνήθως, κατασκευασμένη από κράματα μαγνησίου, αλουμινίου ή χάλυβα.

Ο άξονας που συνδέει το φυγοκεντρικό συμπιεστή με το στρόβιλο, που του παρέχει την κίνηση, εδράζεται σε τριβείς κύλισης (σφαιρικούς ή / και κυλινδρικούς). Σε αρκετές περιπτώσεις αποτελείται από δύο τμήματα που ενώνονται με ειδικό σύνδεσμο, κατάλληλο για εύκολη αποσυναρμολόγηση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τομή αεριοστρόβιλου κινητήρα με φυγοκεντρικό συμπιεστή.

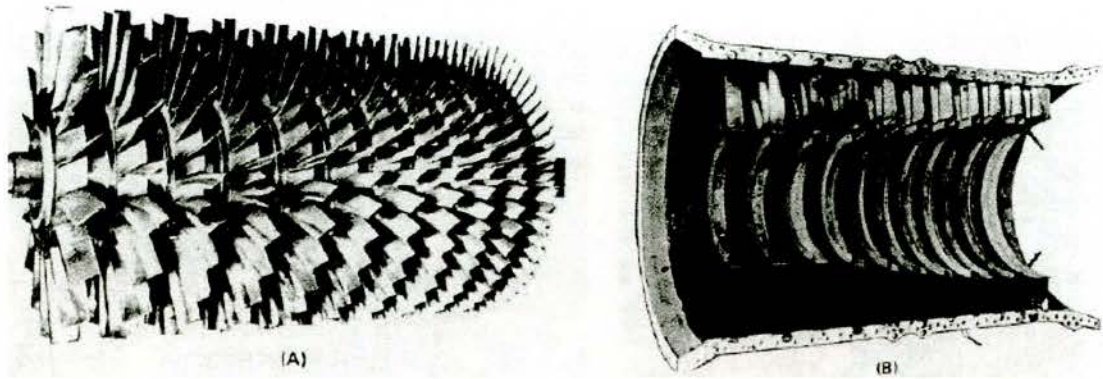


Σχήμα 2.8: Αεριοστρόβιλος κινητήρας με φυγοκεντρικό συμπιεστή διπλής εισόδου

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής έχει ως κύριο πλεονέκτημα την απλότητα της κατασκευής του, την αντοχή του, το μικρό του κόστος και το μεγάλο σχετικά λόγο συμπίεσης που παρέχει με την χρήση μίας μόνο βαθμίδας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς ελικοστρόβιλους κινητήρες. Κύριο μειονέκτημά του είναι η μειωμένη απόδοση. Δε χρησιμοποιείται σε μεγάλους κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν με υψηλούς (συνολικά) λόγους συμπίεσης.

## β2) Αξονικός Συμπιεστής

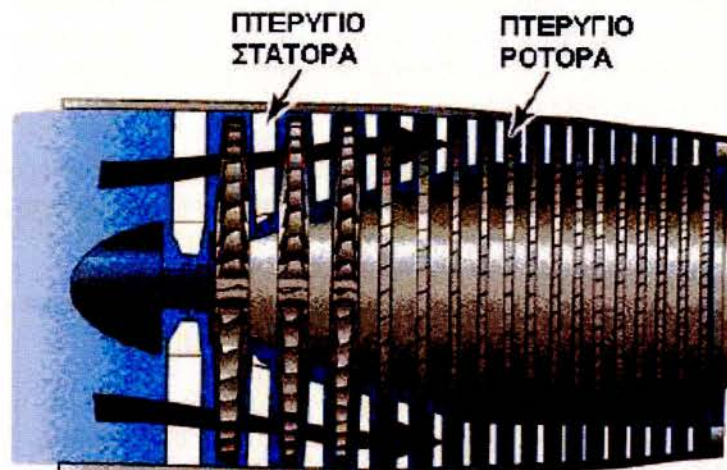
Ο αξονικός συμπιεστής αποτελείται από δύο βασικά μέρη: ένα περιστρεφόμενο, που ονομάζεται ρότορας (rotor), και ένα σταθερό, που ονομάζεται στάτορας (stator). Ο ρότορας αποτελείται από ένα στροφέιο (spindle) πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένα, με κατάλληλο τρόπο, τα κινητά πτερύγια (blades). Ο στάτορας είναι συνήθως διαιρεμένος σε δύο ημικυκλικά τμήματα στην εσωτερική περιφέρεια των οποίων προσαρμόζονται τα σταθερά πτερύγια (vanes). Μία σειρά κινητών με την ακολουθούσα σειρά σταθερών πτερυγίων ονομάζεται βαθμίδα. Ο αξονικός συμπιεστής αποτελείται από πολλές βαθμίδες (ανάλογα το μέγεθος του κινητήρα) γιατί η αύξηση της πίεσης που επιτυγχάνει η κάθε μία είναι μικρή – της τάξης του 1.25:1.



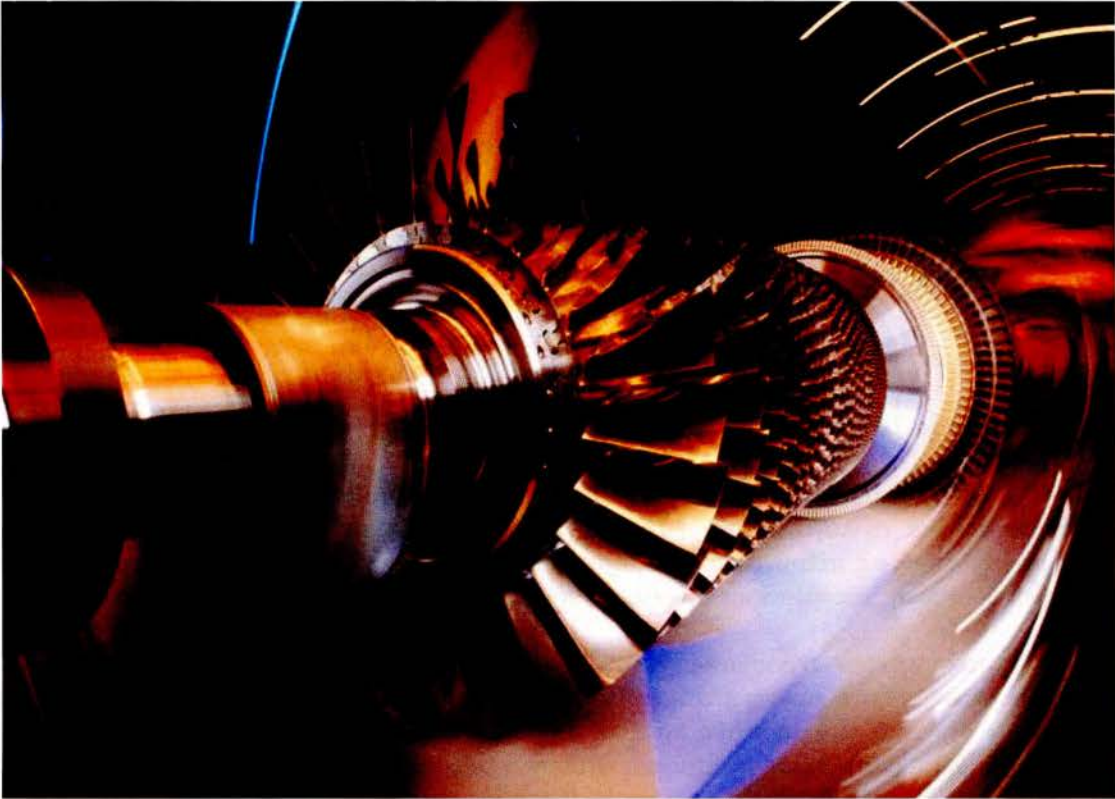
*Σχήμα 2.9: (A) Τα κινητά και (B) τα σταθερά πτερύγια του αξονικού Συμπιεστή*

Τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια έχουν την αεροδυναμική μορφή της πτέρυγας ή του έλικα ενός αεροσκάφους. Για το λόγο αυτόν, η λειτουργία και η απόδοση τους βασίζεται στα αεροδυναμικές αρχές που διέπουν τις πτέρυγες των αεροσκαφών, με ορισμένες πρόσθετες λειτουργικές συνθήκες, όπως η επίδραση της περιστροφής των άλλων πτερυγίων και η ύπαρξη των σταθερών πτερυγίων.

Όπως στις πτέρυγες των αεροσκαφών το παραγόμενο ωφέλιμο μέγεθος είναι η άνωση, στα πτερύγια του αξονικού συμπιεστή είναι η πίεση. Αυτή παράγεται, γενικά, κατά τον ίδιο τρόπο που μία πτέρυγα παράγει άνωση. Από το μπροστινό προς το οπίσθιο τμήμα του συμπιεστή (δηλαδή από το χαμηλή προς την υψηλή πίεση) δημιουργείται μία σταδιακή μείωση της διατομής ανάμεσα στο στροφείο και το περίβλημα. Η μείωση αυτή του δακτυλίου ροής βοηθά την αξονική ταχύτητα του αέρα να διατηρείται σταθερή, καθώς η πίεση και η πυκνότητά του αυξάνονται κατά μήκος του συμπιεστή. Η μείωση της διατομής επιτυγχάνεται με την εφαρμογή κωνικότητας στο περίβλημα ή / και στο στροφείο.



*Σχήμα 2.10: Μείωση δακτυλίου ροής κατά μήκος του αξονικού Συμπιεστή*



*Σχήμα 2.11: Μονός αξονικός συμπιεστής (single spool)*

Ο αξονικός συμπιεστής μονού άξονα ή απλού τυμπάνου (single spool) αποτελείται από ένα στροφέιο, τα κινητά πτερύγια που στηρίζονται πάνω του και σειρές σταθερών πτερυγίων. Είναι συνδεδεμένος μέσω ενός άξονα με το στρόβιλο από τον οποίο παίρνει κίνηση. Ο αριθμός των βαθμίδων καθορίζεται από την επιθυμητή αύξηση της πίεσης. Το σύνολο της ροής του αέρα πραγματοποιείται μέσα από το συμπιεστή. Παρότι αυτός ο τύπος αξονικού συμπιεστή είναι σχετικά απλός στην κατασκευή του και όχι ιδιαίτερα υψηλού κόστους, παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα:

- Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται πολλές βαθμίδες (στο ίδιο στροφέιο), αυτές που βρίσκονται στην περιοχή της αυξημένης πίεσης λειτουργούν με μειωμένη απόδοση, ενώ αυτές που βρίσκονται στις αρχικές θέσεις, συνήθως, υπερφορτίζονται.
- Εξαιτίας της μεγάλης αδρανειακής του μάζας, αντιδρά σχετικά αργά σε απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. εξαιτίας εντολών του χειριστή).

Ο τρόπος για να ξεπεραστούν τα προβλήματα αυτά ήταν η διαίρεση του συμπιεστή σε δύο ή τρία τμήματα. Σε ανάλογο αριθμό τμημάτων χωρίζεται και ο στρόβιλος. Τα τμήματα του συμπιεστή συνδέονται με τα αντίστοιχα του στροβίλου με άξονες στην ίδια ευθεία, που ο ένας βρίσκεται μέσα στον άλλον.

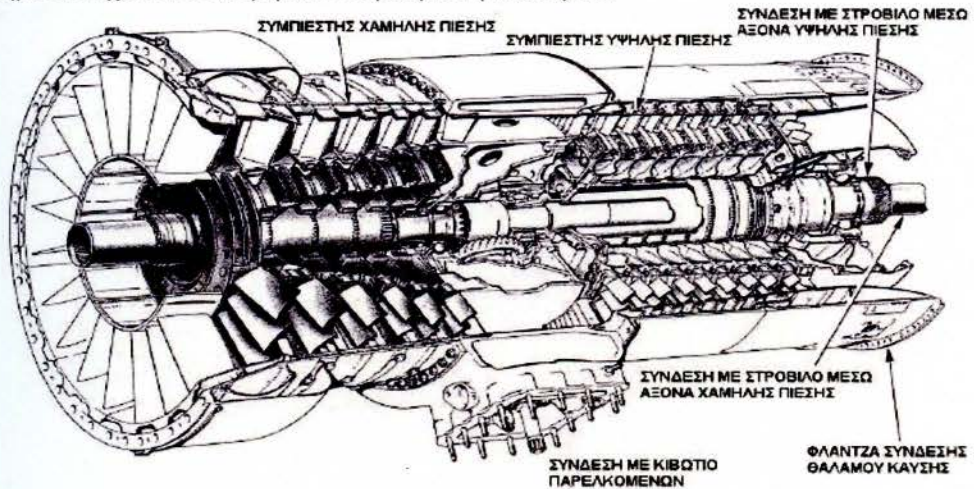
### **β2.1) Συμπιεστής διπλού άξονα**

Ο διαιρούμενος σε δύο τμήματα συμπιεστής ονομάζεται διπλού άξονα ή διπλού τυμπάνου (dual spool, twin spool compressor). Το πρώτο τμήμα ονομάζεται συμπιεστής χαμηλής πίεσης (low pressure compressor) ή συμπιεστής N1. Αυτός συνήθως περιστρέφεται από ένα στρόβιλο με δύο βαθμίδες στο πίσθιο τμήμα της περιοχής του στροβίλου. Το δεύτερο τμήμα ονομάζεται συμπιεστής υψηλής πίεσης



(high pressure compressor) ή συμπιεστής N2 και, συνήθως, περιστρέφεται από ένα μονοβάθμιο στρόβιλο υψηλής πίεσης που βρίσκεται στο μπροστινό τμήμα της περιοχής του στρόβιλου.

Σε κάποιες περιπτώσεις, στο συμπιεστή χαμηλής πίεσης συνδέεται και εμπρός ανεμιστήρας οπότε και περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Συνήθως, η ταχύτητα περιστροφής του συμπιεστή υψηλής πίεσης διατηρείται σχεδόν σταθερή από το ρυθμιστή καυσίμου.

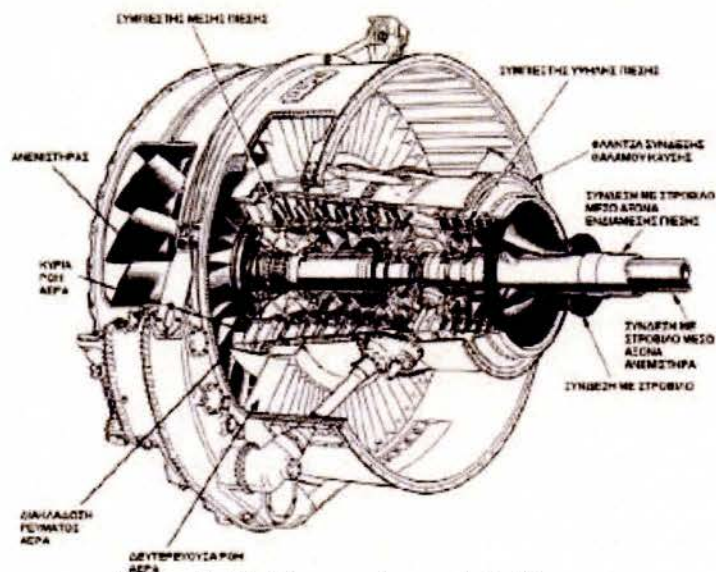


Σχήμα 2.12: Διπλός αξονικός συμπιεστής (double spool compressor)

### β2.2) Συμπιεστής τριπλού άξονα

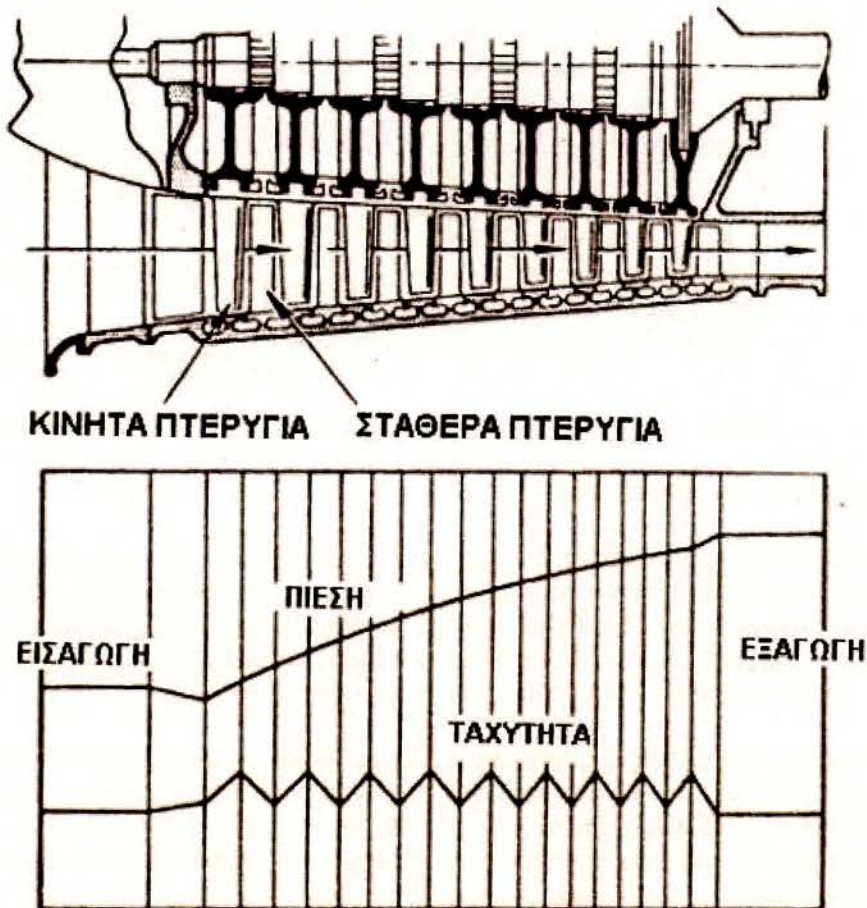
Σε αρκετούς κινητήρες ο συμπιεστής διαιρείται σε τρία τμήματα και ονομάζεται τριπλός (triple-spool compressor). Στην περίπτωση αυτή, ο ανεμιστήρας είναι ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης και συνδέεται με έναν πολυβάθμιο στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Το επόμενο τμήμα ονομάζεται ενδιάμεσος συμπιεστής (intermediate compressor) και το τρίτο τμήμα είναι ο συμπιεστής υψηλής πίεσης. Οι δύο αυτοί συμπιεστές παίρνουν κίνηση από μονοβάθμιους στρόβιλους.

Αυτός ο συμπιεστής χαμηλής πίεσης έχει μεγάλες βαθμίδες και συμπιέζει πολύ μεγαλύτερη μάζα αέρα από τους δύο άλλους. Το μεγάλο ποσοστό του αέρα – το ψυχρό ρεύμα – παρακάμπτει τους δύο άλλους συμπιεστές και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα από ένα ιδιαίτερο δακτυλιοειδές ακροφύσιο. Η υπόλοιπη μάζα του αέρα – το θερμό ρεύμα – συμπιέζεται από τους άλλους συμπιεστές και οδηγείται στο θάλαμο καύσης



Σχήμα 2.13: Συμπιεστής τριπλού άξονα

Τα κινητά πτερύγια στρέφονται σε υψηλές ταχύτητες, από το στρόβιλο με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο συμπιεστής, ώστε να εξασφαλίζεται μία συνεχής ροή αέρα. Ο αέρας επιταχύνεται από τα κινητά πτερύγια και οδηγείται στα σταθερά πτερύγια που ακολουθούν. Εκεί, μειώνεται η ταχύτητα και αυξάνεται η πίεση του λόγω διάχυσης μεταξύ των σταθερών και κινητών πτερυγίων. Οι αλλαγές στην πίεση και την ταχύτητα του αέρα κατά τη διαδρομή του μέσα από το συμπιεστή φαίνονται στον πίνακα 3. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, παρατηρείται μία σταδιακή αύξηση στη θερμοκρασία του αέρα.



*Πίνακας 2.3: Μεταβολές των τιμών πίεσης και ταχύτητας κατά μήκος του συμπιεστή*

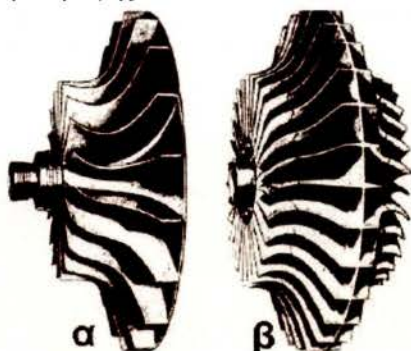
Τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνει ο αξονικός συμπιεστής (σε σύγκριση με το φυγοκεντρικό) είναι τα ακόλουθα:

- Ο λόγος συμπίεσης μπορεί να είναι μεγάλος αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες βαθμίδες χρειάζονται για το στόχο αυτόν.
- Επιτυγχάνεται καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Βέβαια, ο αξονικός συμπιεστής έχει ιδιαίτερα μεγάλο βάρος ενώ απαιτεί και μεγάλη κατανάλωση ισχύος κατά την εκκίνηση. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή συμπίεση που επιτυγχάνεται από κάθε μεμονωμένη βαθμίδα, οπότε απαιτείται η εγκατάσταση πολλών βαθμίδων για τη λειτουργία του. Τέλος, παρουσιάζει ιδιαίτερα πολύπλοκες κατασκευαστικές απαιτήσεις με αποτέλεσμα η τιμή του να είναι υψηλή.

### β3) Το στροφέιο

Αποτελείται από σφυρήλατο δίσκο με ολόσωμα, ακτινικά πτερύγια στη μία (απλής εισόδου, single entry) ή και στις δύο πλευρές του (διπλής εισόδου, double entry). Στο σχήμα 2.14, φαίνεται η τυπική κατασκευή των φυγοκεντρικών συμπιεστών απλής και διπλής εξόδου. Για να διευκολυνθεί η αλλαγή της ροής από την αξονική στην ακτινική διεύθυνση, τα πτερύγια στο κέντρο του στροφείου έχουν μία κλίση προς την κατεύθυνση της περιστροφής.

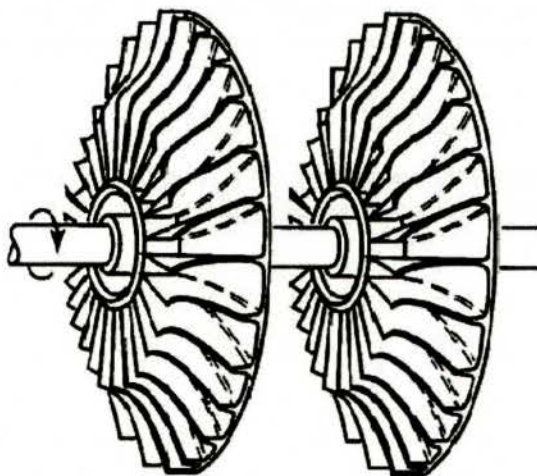


Σχήμα 2.14: Στροφέιο φυγοκεντρικού συμπιεστή (α) απλής και (β) διπλής Εισόδου

Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται κράμα αλουμινίου αλλά και τιτάνιο, σε σύγχρονες εφαρμογές. Το τμήμα εισαγωγής μπορεί να είναι και χαλύβδινο. Η χρήση φυγοκεντρικού συμπιεστή διπλής εισόδου εξασφαλίζει ταχύτητες στα ακροπτερύγια του στροφείου που δεν ξεπερνούν την ταχύτητα του ήχου. Παράλληλα, επιτρέπει τη δίοδο μεγαλύτερης ποσότητας αέρα από το στροφέιο απλής εισόδου και διαμορφώνει μικρότερη μετωπική επιφάνεια.

Όμως, η ροή του αέρα στην οπίσθια πλευρά του κάποιες φορές είναι ασταθής ενώ παρατηρείται και αύξηση της θερμοκρασίας σε μεγαλύτερο ποσοστό από το στροφέιο απλής εισόδου. Σε κάποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα στροφέια απλής εισόδου. Έτσι, επιτυγχάνεται συμπίεση μεγαλύτερης μάζας αέρα. Το πλεονέκτημα, όμως, χάνεται από την απώλεια ενέργειας που παρατηρείται κατά τη μετάβαση του αέρα από το ένα στροφέιο στο άλλο, ενώ τίθεται και θέμα αυξημένου βάρους.

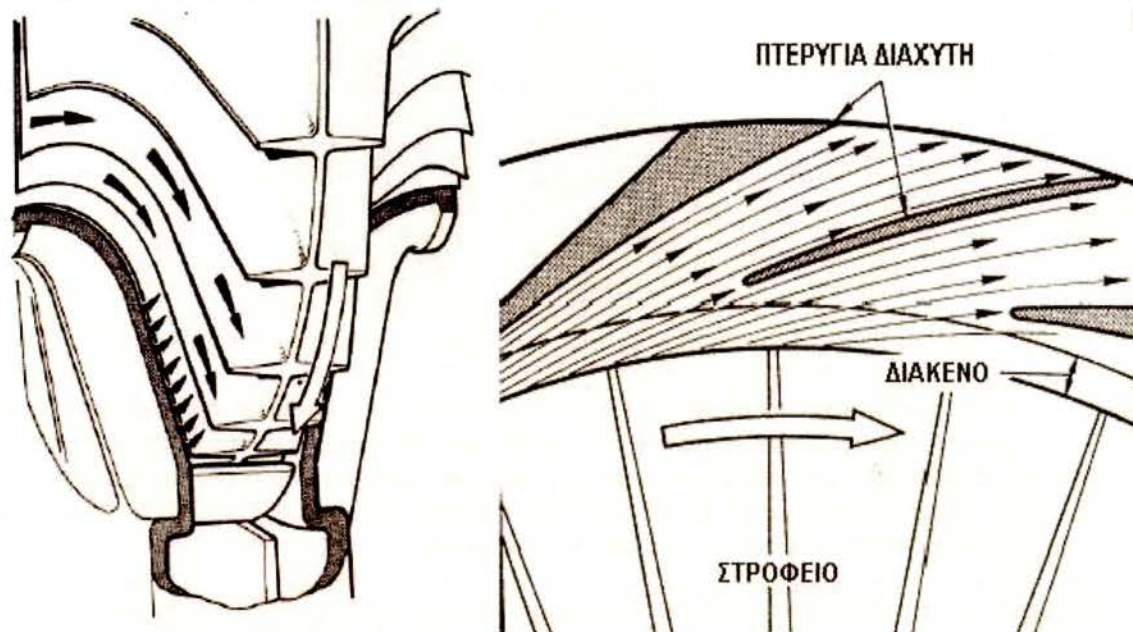
Πρακτικά, σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται δύο στροφέια, όπως φαίνεται στο σχήμα (διβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής, ή δύο βαθμίδων). Το υλικό κατασκευής του περιβλήματος είναι, συνήθως, κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου ενώ η οπίσθια πλευρά είναι από χάλυβα.



Σχήμα 2.15: Φυγοκεντρικός συμπιεστής δύο βαθμίδων

#### β4) Οι διαχύτες.

Αποτελούν ένα σώμα με το περίβλημα του στροφείου ή ξεχωριστό τμήμα. Και στις δύο περιπτώσεις οι διαχύτες διαμορφώνονται από αριθμό πτερυγίων τοποθετημένων εφαπτομενικά ως προς την περιφέρεια του δίσκου. Η διάταξή τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζουν αποκλίνοντες αγωγούς και έτσι να επιτυγχάνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε δυναμική (αύξηση της πίεσης). Η απόσταση μεταξύ του στροφείου και των διαχύτων, που ονομάζεται διάκενο, είναι πολύ σημαντική για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα.

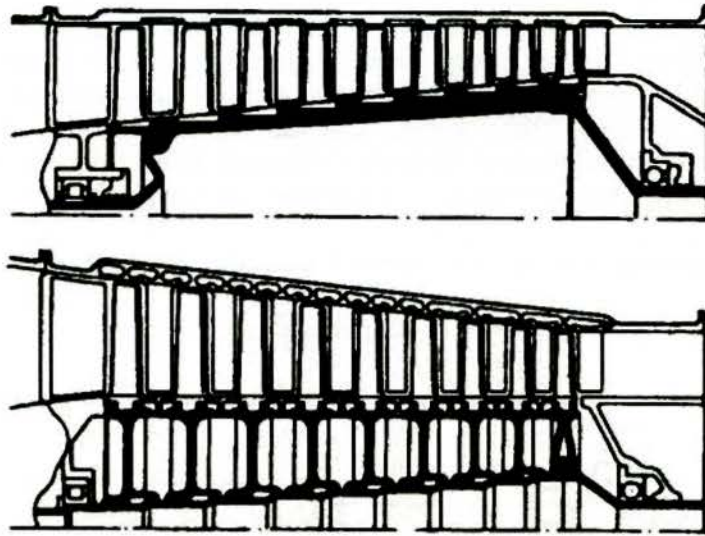


Σχήμα 2.16: Το διάκενο μεταξύ του στροφείου και του διαχύτη

Αν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από αυτήν που προβλέπει ο κατασκευαστής, τότε θα υπάρξει υπερβολική διαρροή (απώλεια) αέρα από το στροφείο. Αντίθετα, αν το διάκενο είναι μικρότερο από την φυσιολογική του τιμή, υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί ασταθής ροή και κραδασμοί. Και αυτό γιατί, καθώς αυξάνεται η πίεση στις ακμές των διαχύτων, τα διερχόμενα από τα σημεία αυτά πτερύγια του στροφείου δέχονται ωθήσεις. Όταν το διάκενο είναι μικρό, οι ωθήσεις αυτές γίνονται αισθητές ως κραδασμοί. Μάλιστα, αν η συχνότητά τους γίνει ίση με την ιδιοσυχνότητα των πτερυγίων, δημιουργούνται φαινόμενα συντονισμού με επακόλουθη εμφάνιση ρωγμών στα πτερύγια.

#### β5) Στροφεία

Το στροφείο του αξονικού συμπιεστή είναι τύμπανο ή συναρμογή αριθμού δίσκων. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνδυασμός των δύο τύπων

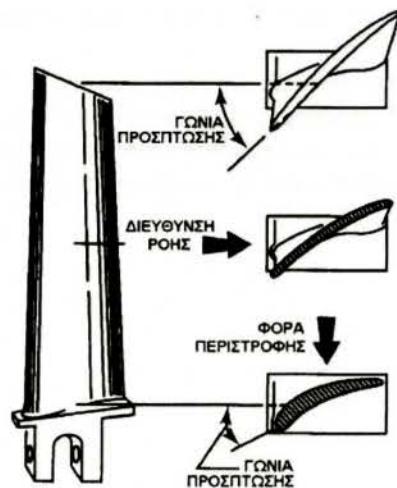


Σχήμα 2.17: Στροφέιο αξονικού συμπιεστή

Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα σφυρήλατο τύμπανο πάνω στο οποίο ασφαρίζονται τα κινητά πτερύγια. Οι γειτονικές στη ρίζα του τυμπάνου περιοχές παραλαμβάνουν αξονικά και ακτινικά φορτία. Η συνολική ώση παραλαμβάνεται από το άκρο του τυμπάνου. Στη δεύτερη περίπτωση κάθε σειρά κινητών πτερυγίων ασφαρίζεται πάνω σε ένα δίσκο που προσαρμόζεται στον άξονα σύνδεσης με το στρόβιλο. Μεταξύ των δίσκων κάθε βαθμίδας τοποθετούνται δακτύλιοι απόστασης (spacers), οι οποίοι παραλαμβάνουν τα αξονικά φορτία. Τα ακτινικά φορτία παραλαμβάνονται από τους δίσκους, οι τελευταίοι από τους οποίους παραλαμβάνουν και τη συνολική ώση.

### β7) Κινητά πτερύγια

Τα κινητά πτερύγια έχουν σχήμα αεροτομής (Σχήμα 19) και μεταβλητή γωνία προσβολής (angle of incidence) ή συστροφή (twist) από τη ρίζα (root) προς το ακροπτερύγιο (tip). Η συστροφή επιτυγχάνει υψηλότερη πίεση στο ακροπτερύγιο ώστε να αντισταθμίζεται η διαφοροποίηση της ταχύτητας του πτερυγίου που προκαλείται από την ακτίνα καμπυλότητάς του. Το μήκος των πτερυγίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση που έχουν κατά μήκος του συμπιεστή.



Σχήμα 2.18: Κινητό πτερύγιο συμπιεστή

Μεγάλη σημασία για την ικανοποιητική λειτουργία του συμπιεστή έχει το θέμα των ανοχών στα κινητά πτερύγια. Τα ακροπτερύγια τους πρέπει να έχουν το προβλεπόμενο από τον κατασκευαστή διάκενο με το περίβλημα του συμπιεστή. Επίσης, η ρίζα του κινητού πτερυγίου πρέπει να «παίζει» όταν τοποθετηθεί στο δίσκο ή το τύμπανο. Η ανοχή αυτή επιτρέπεται ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση και η αφαίρεση τους καθώς και για την απορρόφηση των ταλαντώσεων που δημιουργούνται κατά την περιστροφή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την ασφάλιση των κινητών πτερυγίων στο στροφείο. Οι πιο συνηθισμένοι φαίνονται στο Σχήμα 20:

- Σταθερή ρίζα (solid root) με πείρο συγκράτησης και ασφαλιστικούς δακτυλίους
- Ρίζα με σχήμα ελάτου (fir tree root) με ή χωρίς πλάκα ασφαλείας
- Ρίζα με σχήμα ουράς περιστεριού (dove tail root), όπου ένα από τα πτερύγια χρησιμοποιείται ως ασφαλιστικό.



Σχήμα 2.19: Τρόποι συναρμογής κινητών πτερυγίων συμπιεστή

### β8) Σταθερά πτερύγια

Τα σταθερά πτερύγια τοποθετούνται, όπως είδαμε, μεταξύ των κινητών πτερυγίων και λειτουργούν ως διαχύτες. Ακόμη, διορθώνουν τη διεύθυνση της ροής του αέρα κατά την έξοδο του από την προηγούμενη σειρά κινητών πτερυγίων, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή γωνία ροής για την επόμενη σειρά. Η πρώτη σειρά των σταθερών πτερυγίων έχει το ρόλο των οδηγών πτερυγίων που θα οδηγήσει το εισερχόμενο ρεύμα αέρα στην πρώτη βαθμίδα με τη βέλτιστη γωνία. Η τελευταία σειρά σταθερών πτερυγίων, συνήθως, χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ροής και την αποφυγή δημιουργίας στροβιλισμών κατά την έξοδο του αέρα από το συμπιεστή και την είσοδό του στο θάλαμο καύσης.

Το σχήμα των σταθερών πτερυγίων είναι, όπως και στα κινητά, αυτό της αεροτομής. Στηρίζονται απευθείας στο περίβλημα του στροβίλου (shrouded blades) ή σε ένα δακτύλιο συγκράτησης (retaining ring), ο οποίος με τη σειρά του ασφαλίζεται στο περίβλημα. Σε πολλές περιπτώσεις τα πτερύγια ασφαλιζονται και στο ακροπτερύγιο για την αποφυγή των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων.



Σχήμα 2.20: Σταθερά πτερύγια συμπίεστή

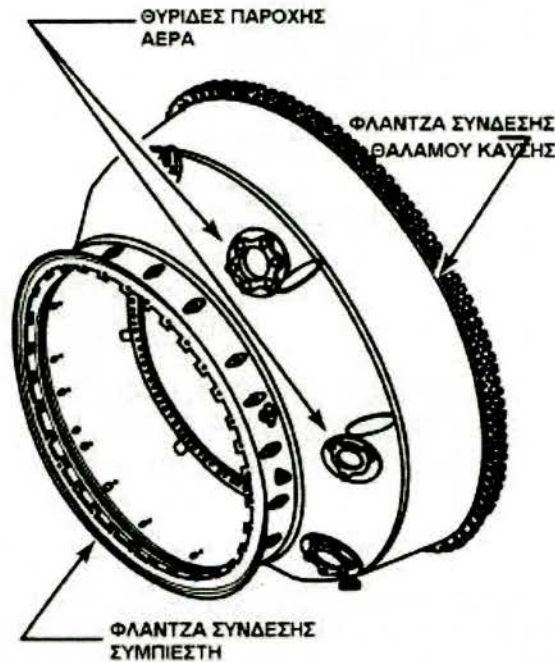
### Υλικά κατασκευής

Γενικά, τα υλικά κατασκευής των τμημάτων του συμπίεστή πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή στις υψηλές πιέσεις συμπίεσης και την άνοδο της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συμπίεση. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται και στην αντοχή των υλικών κατασκευής για την αντιμετώπιση της αναρρόφησης ξένου σώματος. Το περίβλημα του συμπίεστή κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου ή μαγνησίου στο μπροστινό τμήμα του, ενώ για το οπίσθιο χρησιμοποιείται, συνήθως, χάλυβας. Για τα κινητά και τα σταθερά πτερύγια χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου, χάλυβας, νικέλιο ή τιτάνιο, ανάλογα με τη θέση και τις συνθήκες λειτουργίας τους. Σε κάποιες εφαρμογές, σε χαμηλές θερμοκρασίες συμπίεσης, χρησιμοποιούνται πτερύγια από συνθετικό υλικό (ανθρακονήματα), οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση βάρους.

### β9) Διαχύτης

Σκοπός του διαχύτη είναι να κατευθύνει τη μάζα του αέρα, που εξέρχεται από το συμπίεστή, προς το θάλαμο καύσης. Συγχρόνως, μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αέρα σε στατική πίεση. Στο διαχύτη η τιμή της πίεσης λαμβάνει τη μεγαλύτερη τιμή της μέσα στον κινητήρα. Όπως είδαμε, στο φυγοκεντρικό συμπίεστή ο αέρας εισέρχεται, συμπιεσμένος, σε περιφερειακά διατεταγμένους διαχύτες και στη συνέχεια στο θάλαμο καύσης. Στον αξονικό συμπίεστή, ο συμπιεσμένος αέρας διέρχεται από σταθερά οδηγία πτερύγια – την τελευταία σταθερή βαθμίδα του συμπίεστή – για να εισέλθει στο διαχύτη. Μέσα σε αυτόν, η συνεχώς αυξανόμενη διατομή προκαλεί μείωση της ταχύτητας του αέρα και αύξηση της στατικής πίεσης, σύμφωνα με το νόμο του Μπερνούλλι (Bernoulli). Μετά από το διαχύτη, ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης με υψηλή πίεση και χαμηλή ταχύτητα, συνθήκες κατάλληλες, δηλαδή, για την ικανοποιητική ανάμειξή τους με το καύσιμο που εγχύεται.

Ο διαχύτης αποτελεί συνέχεια του περιβλήματος του συμπίεστή ή μπορεί να είναι και διαφορετικό κομμάτι. Και στις δύο περιπτώσεις φέρει θυρίδες για την παροχέτευση πεπιεσμένου αέρα για την εκτέλεση διάφορων βοηθητικών λειτουργιών του κινητήρα. Όπως είδαμε και παραπάνω, θυρίδες παροχέτευσης πεπιεσμένου αέρα υπάρχουν και στο τμήμα του συμπίεστή.



Σχήμα 2.21: Γενική μορφή διαχύτη

### (γ) Θάλαμος καύσης

Η βέλτιστη απόδοση κατά τη διαδικασία της καύσης του μείγματος αέρα – καυσίμου σε έναν αεριοστρόβιλο είναι επιτακτική. Αυτό επιτυγχάνεται στο θάλαμο καύσης. Ταυτόχρονα από τη διαδικασία καθορίζετε επίσης η συνολική απόδοση του κινητήρα αλλά και η επιβάρυνση που θα επιφέρουν στο περιβάλλον οι εκπεμπόμενοι ρύποι.

Σήμερα, η ανάπτυξη των θαλάμων καύσης (combustion chambers) βασίζεται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από τη χρήση τους σε αεροκινητήρες που λειτούργησαν με περισσότερη ή λιγότερη επιτυχία στο παρελθόν. Είναι σύνηθες, όσο και επιβεβλημένο, να προτείνονται διαφορετικές λύσεις για ένα δεδομένο σύστημα καύσης, όμως κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές απαντώνται σε κάθε θάλαμο καύσης.

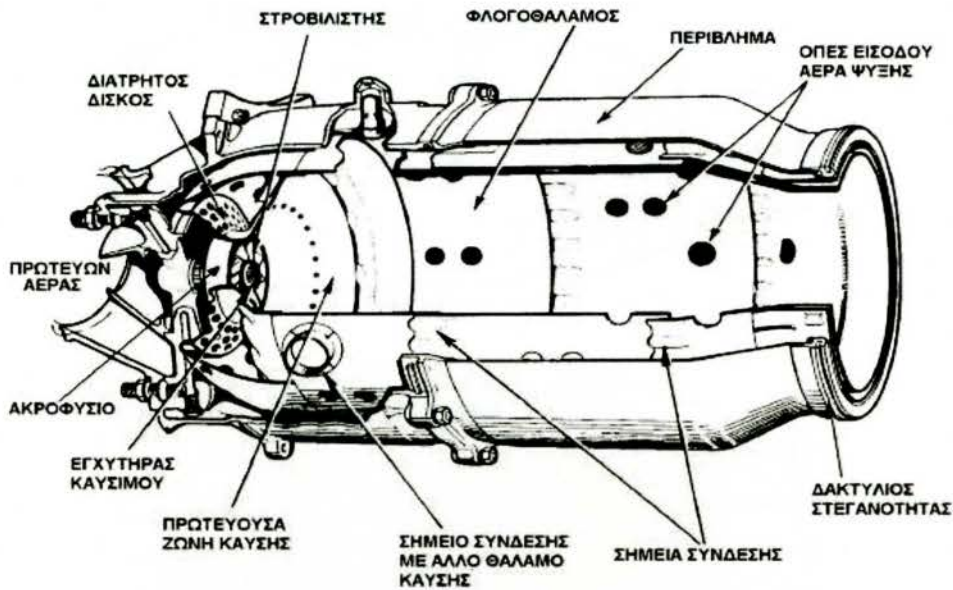
### Λειτουργία ενός θαλάμου καύσης σε έναν αεριοστρόβιλο κινητήρα

Ο βασικός σκοπός του θαλάμου καύσης είναι να επιτύχει την καύση συγκεκριμένης ποσότητας μείγματος αέρα (ο οποίος εξέρχεται από το συμπιεστή) και καυσίμου. Τα παραγόμενα καυσαέρια αποδίδουν τη θερμική ενέργειά τους στο στρόβιλο, που βρίσκεται μετά το θάλαμο καύσης. Η διαδικασία της καύσης πραγματοποιείται στην περιορισμένη έκταση του θαλάμου καύσης και πρέπει να επιτυγχάνεται με την ελάχιστη δυνατή απώλεια πίεσης (ισοβαρής καύση).

Ένας θάλαμος καύσης αποτελείται από:

- Το περίβλημα,
- Το στρόβιλο,
- Τον εγχυτήρα καυσίμου
- Το φλογοσωλήνα, όπου πραγματοποιείται η καύση.

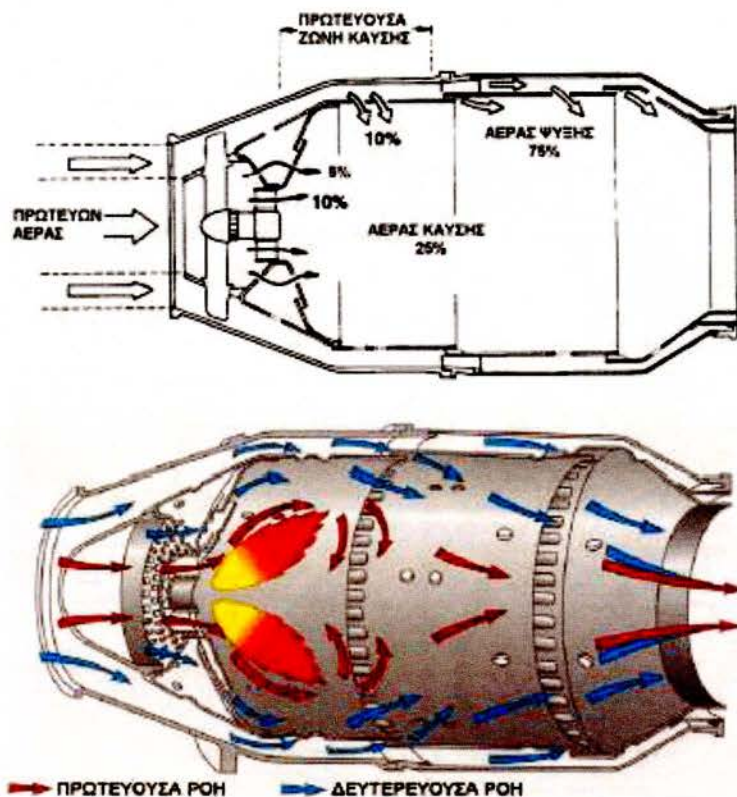




Σχήμα 2.22: Θάλαμος καύσης

Το συμπιεσμένο ρεύμα αέρα εξέρχεται από το συμπιεστή με ταχύτητα της τάξης των 150 m/sec. Η ταχύτητα αυτή είναι απαγορευτική για τη διαδικασία της καύσης και πρέπει να μειωθεί σημαντικά. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται στην περιοχή του διαχύτη που βρίσκεται μεταξύ του συμπιεστή και θαλάμου καύσης. Η διατομή του δακτυλίου ροής αυξάνει προοδευτικά και με τον τρόπο αυτόν μειώνεται η ταχύτητα του ρεύματος αέρα ενώ αυξάνεται η στατική του πίεση. Μετά τη διόδο από το διαχύτη η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι της τάξης των 25 m/sec, τιμή επίσης μεγάλη για την κανονική καύση. Η περαιτέρω μείωσή της σε τιμές της τάξης των 5 m/sec επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διάτρητου δίσκου (perforated disk), ο οποίος αποτελεί εξάρτημα του θαλάμου καύσης και βρίσκεται περιφερειακά από τον εγχυτήρα καυσίμου (fuel nozzle).

Ένας ακόμη σκοπός του θαλάμου καύσης είναι η παροχή του σωστής αναλογίας όσον αφορά το μείγμα αέρα – καυσίμου. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, ο λόγος αέρα – καυσίμου παίρνει τιμές μεταξύ 45:1 και 80:1. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, η κηροζίνη, καίγεται αποδοτικά όταν ο παραπάνω λόγος έχει τιμή 15:1, περίπου. Αυτό σημαίνει ότι μόνο ένα μέρος του εισερχόμενου στο θάλαμο καύσης αέρα απαιτείται για την κανονική καύση και, πρακτικά, μόνον αυτό θα αναμειχθεί με το καύσιμο. Η ανάμειξη αυτή πραγματοποιείται στο μπροστινό τμήμα του θαλάμου καύσης.



Σχήμα 2.23: Ροές στο θάλαμο καύσης

Αρχικά, ένα ποσοστό (περίπου 25%) του εισερχόμενου αέρα στο θάλαμο καύσης, η πρωτεύουσα ροή, διέρχεται από αγωγό με κατάλληλα διαμορφωμένη διατομή. Η υπόλοιπη ποσότητα του εισερχόμενου αέρα, η δευτερεύουσα ροή, η οποία είναι και η μεγαλύτερη (ποσοστό περίπου 75%), εισέρχεται στο δακτυλιοειδή χώρο που δημιουργείται μεταξύ της περιφέρειας του φλογοσωλήνα και του περιβλήματος του θαλάμου καύσης. Στην περιοχή του αγωγού εισόδου της πρωτεύουσας ροής υπάρχουν τα σταθερά πτερύγια (swirl vanes) του στροβιλιστή. Αυτά ανακόπτουν την αξονική ταχύτητα του εισερχόμενου από αυτά αέρα (10% περίπου), ενισχύοντας την περιφερειακή ταχύτητά του. Ένα ποσοστό 5%, περίπου, αέρα διέρχεται από το διάτρητο δίσκο (που αναφέρθηκε παραπάνω) και η ταχύτητά του μειώνεται στα επιθυμητά επίπεδα. Τελικά, το ρεύμα αέρα που εισέρχεται στην πρωτεύουσα ζώνη καύσης (primary combustion zone), έχει αποκτήσει στροβιλισμό, απαραίτητο για την ομαλή κυκλοφορία του μέσα στο φλογοσωλήνα αλλά και για την καλή ανάμειξη του καύσιμου μείγματος.

Στην περιοχή αυτή, η οποία αποτελεί το ένα τρίτο του συνολικού μήκους του φλογοθαλάμου, πραγματοποιείται η έναυση και η καύση του καύσιμου μείγματος. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εκεί μπορούν να φτάσουν τους 2.000°C, τιμή πολύ μεγαλύτερη από την αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φλογοθαλάμων. Για το λόγο αυτό, στην περιοχή της πρωτεύουσας ζώνης καύσης υπάρχουν δίοδοι εισαγωγής αέρα για την ψύξη των τοιχωμάτων του φλογοθαλάμου (Σχήμα 24). Ο αέρας αυτός προέρχεται από την ποσότητα του διερχόμενου αέρα από τη περιφέρεια του φλογοσωλήνα, σε ποσοστό 10%. Η υπόλοιπη ποσότητα του ρεύματος αέρα αυτού εισέρχεται στο φλογοθάλαμο μέσω ειδικών οπών του, κατά μήκος της περιοχής

ρεύματος αέρα μετά την ψύξη θερμοκρασιών

από τα παραγόμενα καυσαέρια, θα επιφέρει μείωση στη θερμοκρασία τους. Συνολικά, από τον εισερχόμενο αέρα στο θάλαμο καύσης, ένα ποσοστό 20% έως 30% συμμετέχει στη διεργασία της καύσης ενώ το υπόλοιπο 70% έως 80% χρησιμοποιείται για λόγους ψύξης. Ο απαραίτητος σπινθήρας για την έναυση παρέχεται μία φορά από ειδικό σπινθηριστή ο οποίος έχει ικανότητα παραγωγής έως και 100 σπινθήρων ανά λεπτό. Στη συνέχεια, η καύση διατηρείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στην πρωτεύουσα ζώνη της καύσης.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του θαλάμου καύσης πρέπει να παρουσιάζουν αντοχή στις θερμικές καταπονήσεις (thermal stresses), στη διάβρωση που επιφέρουν τα προϊόντα της καύσης και στους κραδασμούς της λειτουργίας. Συνήθως, για την κατασκευή του φλογοθαλάμου χρησιμοποιούνται κράματα χάλυβα με νικέλιο και χρώμιο ενώ το περίβλημα κατασκευάζεται από ελαφρύ χάλυβα.

#### δ) Στρόβιλος

Η μετατροπή της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ πραγματοποιείται μέσα στον περιορισμένο χώρο που κατέχει ο στρόβιλος. Η ισχύς που παρέχει ο στρόβιλος κατά τη λειτουργία του μπορεί να πάρει τιμές της τάξης των 50.000 Hp, ενώ σε κάποια είδη στροβίλου ένα και μόνο πτερύγιο του στροβίλου μπορεί να παράγει ισχύ έως και 250 Hp. Επίσης, αξιοσημείωτες είναι οι θερμοκρασίες λειτουργίας στην είσοδο του στροβίλου, οι οποίες μπορούν να φτάσουν και τους 1650°C.

#### Λειτουργία στροβίλου

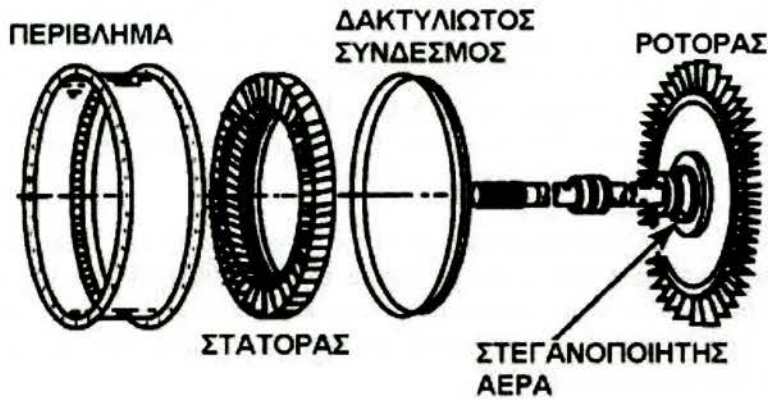
Η λειτουργία του στροβίλου είναι ακριβώς η αντίθετη με τη λειτουργία του συμπιεστή. Αυτός προσθέτει ενέργεια στο εισερχόμενο ρεύμα αέρα μετατρέποντας τη μηχανική του ενέργεια σε δυναμική του ρεύματος αέρα. Αντίθετα, ο στρόβιλος απορροφά ενέργεια από το ρεύμα των θερμών καυσαερίων, κατά την έξοδό τους από το θάλαμο καύσης, και τη μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια για την παραγωγή ισχύος ή ροπής. Στους αεριοστρόβιλους κινητήρες χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο στρόβιλος αξονικού τύπου καθώς έχει την ικανότητα να διαχειριστεί μεγάλη παροχή καυσαερίων και σε υψηλό αριθμό στροφών. Όπως ο συμπιεστής, και ο στρόβιλος απαντάται σε μονοβάθμιο και πολυβάθμιο, ανάλογα πάντα το πεδίο εφαρμογής.

Η βαθμίδα του στροβίλου αποτελείται από:

- Μία σειρά σταθερών πτερυγίων (vanes), γνωστά και ως στάτορας ή στάτης (stator)
- Μία σειρά κινητών πτερυγίων (blades), γνωστά και ως ρότορας (rotor) ή στροφείο

Γενικά, ο στρόβιλος αποτελείται από:

- το περίβλημα (casing), το οποίο περιβάλλει το στάτορα και το ρότορα. Συνήθως, φέρει φλάντζες στα δύο του άκρα για τη σύνδεση του τμήματος του στροβίλου με τα τμήματα του θαλάμου καύσης και του ακροφυσίου εξαγωγής.
- το στάτορα
- το δακτύλιο (shroud), που τοποθετείται στην εσωτερική και εξωτερική περιφέρεια των σταθερών πτερυγίων του στάτορα.
- το ρότορα.

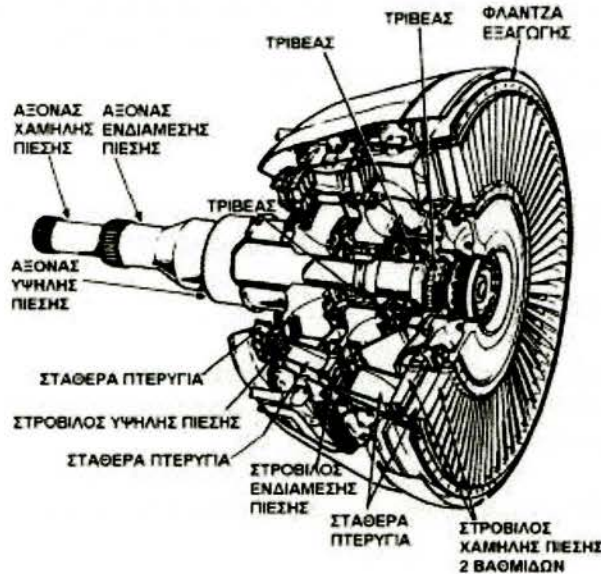


Σχήμα 2.24: Άξονας στροβίλου

Ο αριθμός των βαθμίδων και των στροβίλων που τοποθετούνται στο στρόβιλο εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

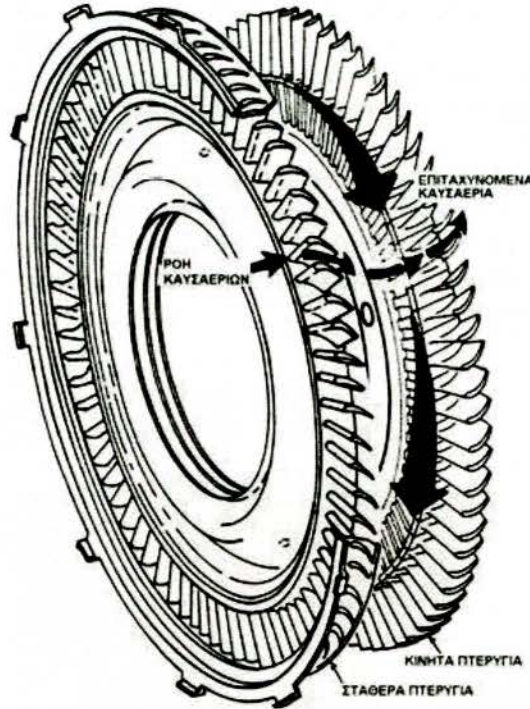
- Τον αριθμό των αξόνων που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση του συμπιεστή με το στρόβιλο
- Το ποσό της ενέργειας που θα εξαχθεί από τα καυσαέρια και την απαιτούμενη ισχύ
- Τον αριθμό των στροφών λειτουργίας (RPM),
- Τη μέγιστη διάμετρο την οποία μπορεί να λάβει το στροφέιο του στροβίλου
- Τις θερμοκρασίες και πιέσεις στην είσοδο και την έξοδο του στροβίλου.

Οι αεριοστρόβιλοι που λειτουργούν με υψηλούς λόγους συμπίεσης χρειάζονται πολυβάθμιους στροβίλους. Επίσης, ο αριθμός των αξόνων που χρησιμοποιούνται θα καθορίσει και τον αριθμό των βαθμίδων που θα χρησιμοποιηθούν στους στροβίλους.



Σχήμα 2.25: Στρόβιλος (Gas Turbine)

Γενικά ισχύει η αντίστροφη διαδικασία που συμβαίνει στο ψυχρό τμήμα του αεριοστρόβιλου, με λίγα λόγια ο διάχυτης είναι το αντίστροφο του συμπιεστή. Η διατομή της περιοχής μεταξύ δύο διαδοχικών κινητών πτερυγίων του στροβίλου μειώνεται προς το χείλος εκφυγής τους. Έτσι, η ροή των καυσαερίων επιταχύνεται, με παράλληλη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας τους, και οι συνθήκες γίνονται κατάλληλες για την παραγωγή έργου



Σχήμα 2.26: Ροή καυσαερίων διαμέσου των βαθμίδων του στροβίλου

Ο τρόπος κατασκευής και συναρμολόγησης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων που αποτελούν το στρόβιλο έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στη λειτουργία και την απόδοση του κινητήρα. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι τα μέρη αυτά εκτίθενται στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων (της τάξης των  $1.300^{\circ}\text{C}$ ), αμέσως μετά την έξοδο των τελευταίων από το θάλαμο καύσης. Ιδιαίτερα για την πρώτη σειρά σταθερών πτερυγίων, η οποία έρχεται πρώτη σε επαφή με τα καυσαέρια, εφαρμόζεται η επικάλυψή τους με στρώμα θερμικής προστασίας (thermal coating). Το στρώμα αυτό έχει πάχος λίγα εκατοστά του χιλιοστού και ως υλικό χρησιμοποιούνται ανθεκτικά κράματα, όπως το κράμα νικελίου – αλουμινίου, σε μορφή πούδρας. Με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η αντοχή τους στις διαβρωτικές επιπτώσεις της επαφής τους με τα καυσαέρια.

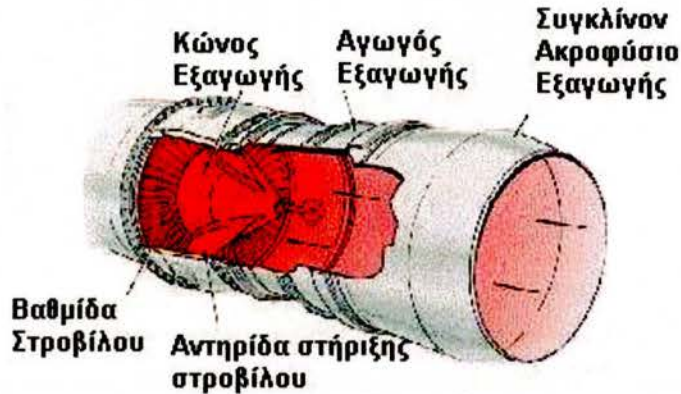
Ο στρόβιλος είναι σχεδιασμένος με τρόπο τέτοιο ώστε στην έξοδο του να επιτυγχάνεται ροή των καυσαερίων στην αξονική διεύθυνση, και μόνο. Όμως, πάντα παρουσιάζονται στροβιλισμοί, οι οποίοι δε συμβάλλουν στην παραγωγή ώσης και θεωρούνται ως απώλειες. Μία μέθοδος εξάλειψής τους είναι η τοποθέτηση στην έξοδο του στροβίλου μίας σειράς σταθερών πτερυγίων, ενώ συμβάλλει και η χρήση κινητών πτερυγίων με γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνδυασμένου τύπου. Άλλες μορφές απωλειών είναι οι αεροδυναμικές απώλειες κατά τη δίοδο των καυσαερίων από το στάτορα και ρότορα του στροβίλου, η διαρροή αέρα από τα ακροπτερύγια των κινητών πτερυγίων καθώς και από το τμήμα της εξαγωγής.

### ε) Εξαγωγή

Το σύστημα εξαγωγής στους αεριοστρόβιλους οδηγεί τα καυσαέρια, μετά την τελευταία κινητή βαθμίδα του στροβίλου στην ατμόσφαιρα. Τα καυσαέρια, μετά το στρόβιλο βρίσκονται σε μία κατάσταση υψηλής, σχετικά, πίεσης (ως προς την ατμοσφαιρική) και χαμηλής ταχύτητας. Σε ένα στροβιλοαντιδραστήρα, είναι απαραίτητη, για την παραγωγή ώσης, η αύξηση της ταχύτητας των καυσαερίων, τα οποία εξωθούνται στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς το σύστημα εξαγωγής σε έναν στροβιλοαντιδραστήρα, έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων στην έξοδο, με αντίστοιχη μείωση της πίεσης στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής.

Αντίθετα, σε έναν αεριοστρόβιλο που παράγει ηλεκτρική ενέργεια, δεν υπάρχει απαίτηση παραγωγής ώσης και για τον οποίο η κύρια παραγωγή έργου πραγματοποιείται μέσω της εκτόνωσης των καυσαερίων στις βαθμίδες του στρόβιλου, άρα η βασική λειτουργία του συστήματος εξαγωγής, είναι να οδηγήσει τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα, με τη μικρότερη δυνατή ταχύτητα.

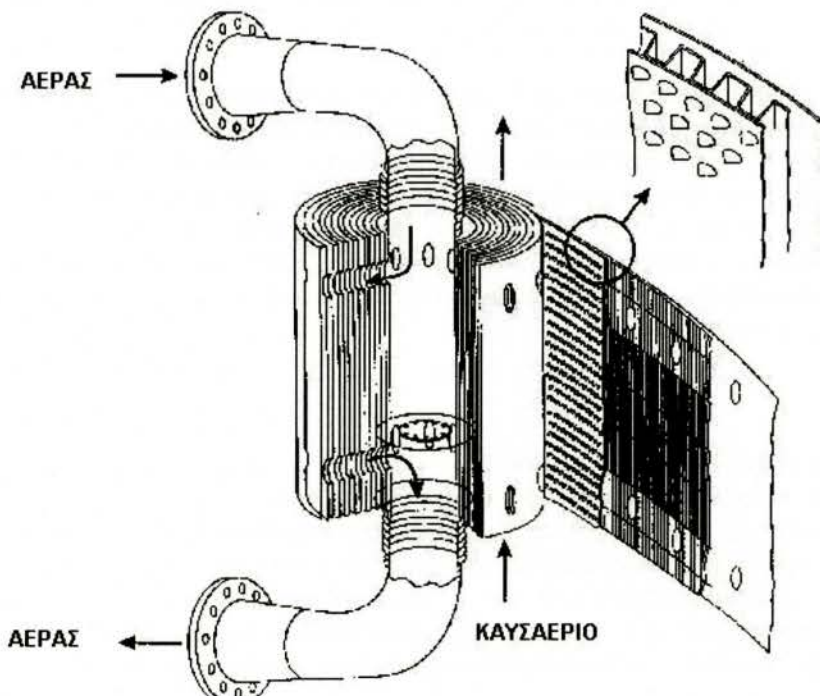
Ο σχεδιασμός της εξαγωγής καυσαερίων σε αεριοστρόβιλους, έχει πολύ μεγάλη σημασία για τις επιδόσεις του κινητήρα. Το σχήμα και το μέγεθος της εξαγωγής, επηρεάζουν τόσο τη θερμοκρασία εισαγωγής των καυσαερίων στο στρόβιλο (Turbine Inlet Temperature – TIT), την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα και φυσικά την πίεση και την ταχύτητα του ρεύματος καυσαερίων, που εξωθούνται στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.27: Εναλλάκτες θερμότητας

### Εξαγωγή αεροστρόβιλου φυσικού αερίου

Αυτοί είναι διαφορετικής μορφής ανάλογα με τη θέση τους στο θερμοδυναμικό κύκλο. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι ο αναγεννητικός προθερμαντήρας αέρα (regenerative), ο ενδιάμεσος ψύκτης (intercooler) και ο αντικαταστάτης του θαλάμου καύσης (σε συστήματα κλειστού κύκλου). Ο πιο συνηθής είναι ο πρώτος. Πέρα από τα παραπάνω βασικά στοιχεία, ο αεριοστρόβιλος έχει και συστήματα καύσιμου, λίπανσης, ελέγχου γωνιακής ταχύτητας του άξονα βαλβίδες αναρρόφησης αέρα, έναυσης κλπ.



Σχήμα 2.28: Ο αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας

## 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### “ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ”

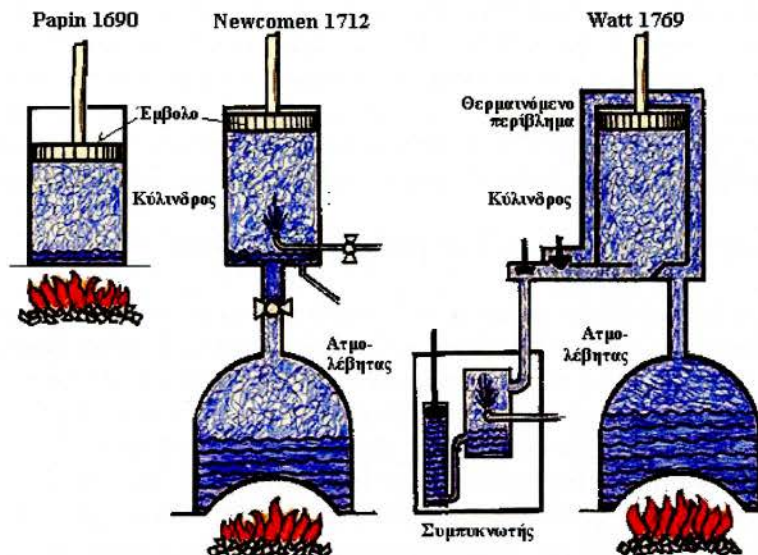
#### 3.1 Γενικά

Ο ατμοστρόβιλος είναι ένα είδος κινητήριας θερμικής μηχανής, που χρησιμοποιεί την ενέργεια του ατμού για παραγωγή έργου. Συχνά αναφέρεται και ως ατμοτουρμπίνα. Ο ατμός, η κινητήρια δύναμη του ατμοστρόβιλου είναι συνυφασμένος με τον όρο της ατμοπαραγωγής δηλαδή τη μετατροπή του νερού σε ατμό με τη βοήθεια της θερμότητας.

#### 3.1.1 Ιστορία των Ατμοστρόβιλων

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, ήταν γνωστή ήδη από τα αρχαία χρόνια η παράγωγή έργου με χρήση ατμού. Η Αιολοπούλη του Ήρωνα, ήταν ο πρόδρομος των σημερινών ατμοστρόβιλων. Στους επόμενους αιώνες όμως αναξιοποίητες έμειναν οι ιδέες του Ήρωνα και των άλλων ερευνητών της ελληνοιστικής εποχής, τόσο λόγω του αντιεπιστημονικού πνεύματος που επικρατούσε σε Ανατολή και Δύση, όσο και λόγω της συνεχιζόμενης έλλειψης οικονομικών κινήτρων για κατασκευή μηχανών, με τις οποίες θα γινόταν υποκατάσταση της απαιτούμενης δύναμης του νερού, του αέρα, των ανθρώπων και των ζώων στις παραγωγικές διαδικασίες.

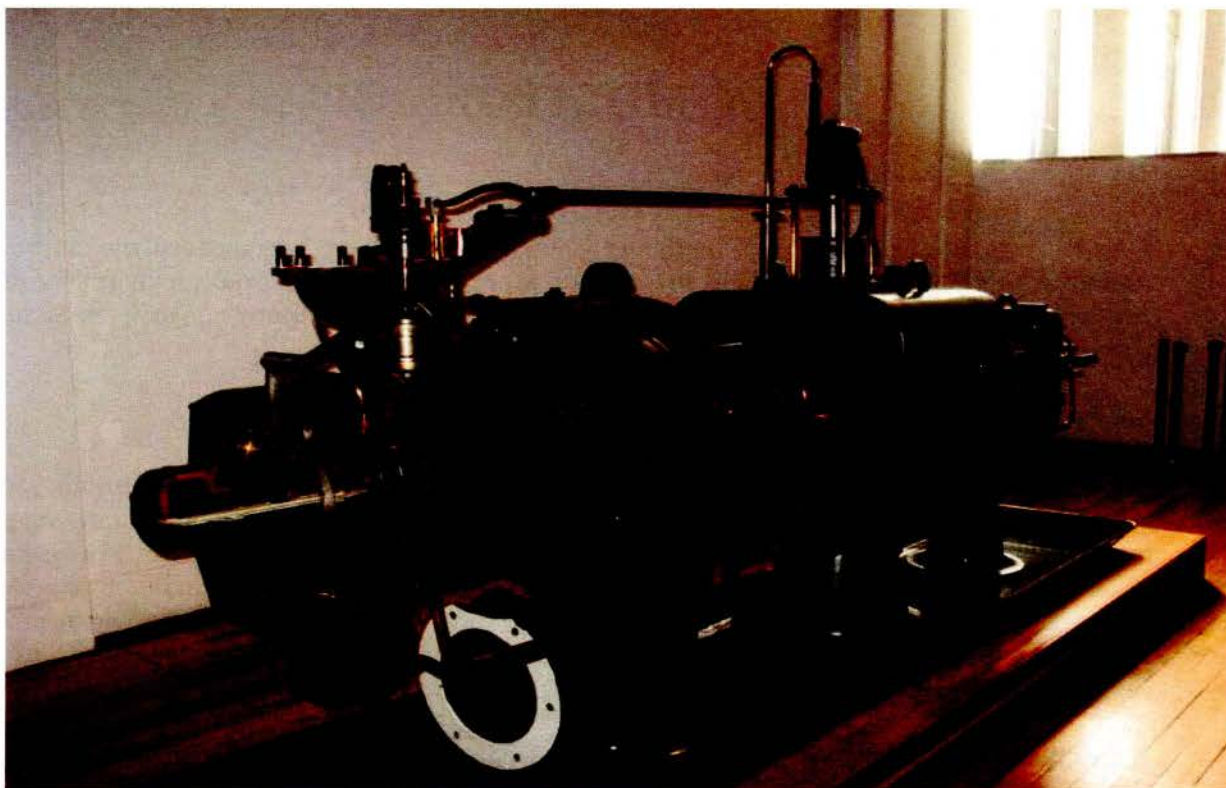
Η πρώτη αλλαγή ήρθε στο τέλος του 17ου αιώνα, συγκεκριμένα το 1690, οπότε κατασκεύασε ο Denis Papin, μία ατμομηχανή, η οποία ονομάστηκε αργότερα ατμοσφαιρική. Ισχυρό κίνητρο για την κατασκευή αυτής της μηχανής ήταν οι ανάγκες για κινητήρια δύναμη με στόχο την άντληση των υπόγειων υδάτων από τις στοές των ορυχείων. Αντίστοιχη συσκευή κατασκευάστηκε και από τον Taqi al-Din στην Οθωμανική Αίγυπτο το 1551 και τον Ιταλό Giovanni Branca το 1629. Αυτές οι πρώιμες συσκευές έχουν πολλές διαφορές από τους σύγχρονους ατμοστρόβιλους.



Σχήμα 3.1: Η εξέλιξη της ατμομηχανής

Ο De Laval κατασκεύασε αρχικά έναν μικρό αεριοστρόβιλο αντίδρασης υψηλής ταχύτητας. Προχώρησε στην κατασκευή της πρώτης βαθμίδας δράσεως που φέρει και το όνομά του. Ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε το συγκλίνον/αποκλίνον ακροφύσιο για να προσδώσει την υψηλή ταχύτητα ατμού που απαιτείται για να κινήσει τον τροχό του στροβίλου του. Ο Sir Parsons, Βρετανός

αριστοκράτης, κατασκεύασε τον πρώτο πολυβάθμιο ατμοστρόβιλο αντίδρασης με σκοπό την κίνηση πλοίων.



*Σχήμα 3.2: Ο ατμοστρόβιλος του Parsons (1884) εκθέτεται στο μουσείο Επιστήμων του Λονδίνου*

Ο πρώτος στρόβιλος του Parsons κατασκευάστηκε το 1884 ενώ το πρώτο πλοίο που κινήθηκε από τον ατμοστρόβιλό του καθελκύστηκε το 1895 και ονομάστηκε «Turbiniia». Ακόμα ο Parson κατασκεύασε και έναν ατμοστρόβιλο που τον συνέδεσε με γεννήτρια και παρήγαγε 7,5kW ηλεκτρικής ενέργειας. Η πατέντα του Parsons Καταχωρήθηκε και ο Westinghouse ήταν ο πρώτος που εξασφάλισε τα δικαιώματα της πατέντας αυξάνοντας την ισχύ του ατμοστρόβιλου. Ο σχεδιασμός των ατμοστρόβιλων του ήταν απλό να αναχθεί σε κατασκευές μεγαλύτερης κλίμακας. Έτσι κατά την διάρκεια ζωής του Parsons η ισχύς των ατμοστρόβιλων αυξήθηκε κατά 75.000 φορές. Άλλοι που κατασκεύασαν ατμοστρόβιλους ήταν ο Γάλλος C.E.A. Rateau που κατασκεύασε πολυβάθμιο ατμοστρόβιλο δράσης, ενώ ο Αμερικάνος C.G. Curtis ανέπτυξε τον ομόνυμο στρόβιλο δράσης με διαβάθμιση ταχύτητας

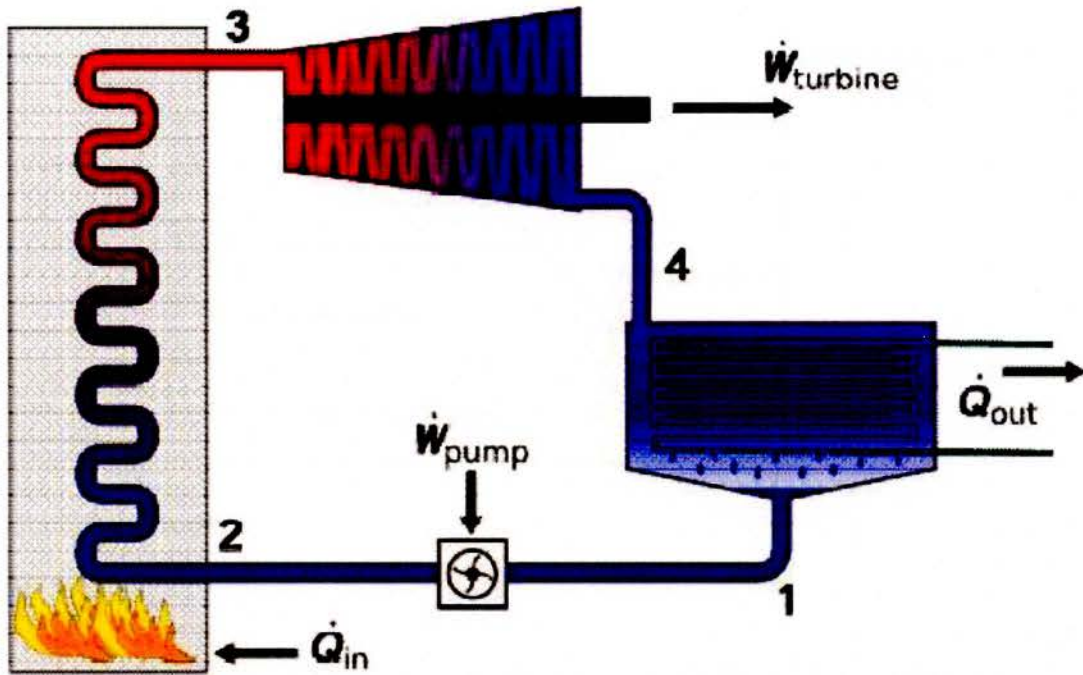
### **3.1.2 Κύκλος Λειτουργίας Ατμοστρόβιλου (Rankine)**

Η παραγωγή μηχανικού έργου με την χρήση ατμού γίνεται με τον κύκλο Rankine. Ο κύκλος Rankine είναι ο θερμοδυναμικός κύκλος που μετατρέπει την θερμότητα σε έργο. Βασικό χαρακτηριστικό όλων των θερμικών σταθμών είναι ότι εκτελούν μια κυκλική μεταβολή εργαζόμενου μέσου, που ποικίλλει ανάλογα με την φύση και την λειτουργία του σταθμού, στην οποία υπάρχει ένα θερμό θερμοδοχείο, που είναι συνήθως η εστία, ο καυστήρας, ή γενικότερα ο χώρος στον οποίο γίνεται η καύση ή η είσοδος της θερμότητας στον κύκλο, και από τον οποίο απορροφάται θερμότητα μέσω του εργαζόμενου μέσου. Μέρος αυτής της θερμότητας μετατρέπεται σε μηχανικό έργο και, καθώς καμία θερμική μηχανή δεν μπορεί να μετατρέψει πλήρως την θερμότητα σε έργο λόγω του δευτέρου θερμοδυναμικού αξιώματος, η υπόλοιπη θερμότητα αποβάλλεται σε ένα ψυχρό θερμοδοχείο. Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί ο κύκλος με χρήση νερού-ατμού Rankine, που συμβαίνει σε συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς.

Η θερμότητα παρέχεται εξωτερικά σε ένα κλειστό κύκλωμα, που συνήθως χρησιμοποιεί σαν εργαζόμενο μέσο νερό. Σχεδόν όλοι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, πυρηνικοί, λιθανθρακικοί,



πετρελαϊκοί, χρησιμοποιούν τον κύκλο Rankine για την παραγωγή έργου. Ακόμα ο κύκλος Rankine μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δευτερεύων κύκλος σε συνδυασμένους κύκλους.



Σχήμα 3.3: Η υλοποίηση του απλού κύκλου Rankine

Στους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς τυπικοί βαθμοί απόδοσης είναι 40-45%+. Στον απλό κύκλο Rankine γίνονται οι ακόλουθες διεργασίες:

**Διεργασία 1-2** Το εργαζόμενο μέσο αντλείται από χαμηλή σε υψηλή πίεση και καθώς το εργαζόμενο μέσο είναι ασυμπύεστο ρευστό η διεργασία αυτή απαιτεί μικρή σχετικά ισχύ.

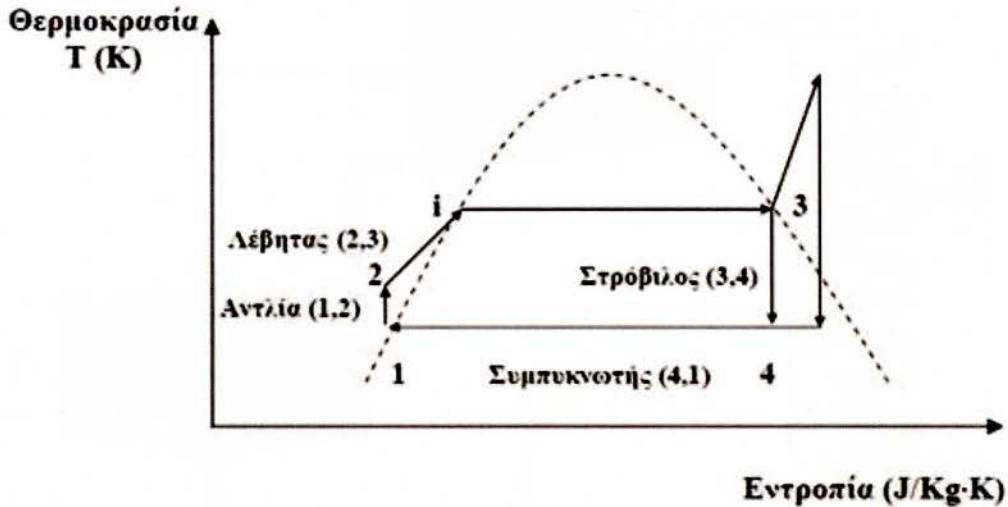
**Διεργασία 2-3** Το υψηλής πίεσης υγρό εισέρχεται σε έναν ατμοπαραγωγό, όπου θερμαίνεται σε σταθερή πίεση (πρακτικά πάντα υπάρχουν κάποιες απώλειες πίεσης) από εξωτερική πηγή θερμότητας ώστε να μετατραπεί σε ξηρό ατμό (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού). Η διεργασία αυτή μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στάδια:

- Στάδιο προθέρμανσης που γίνεται από την έξοδο της αντλίας (υπόψυκτο νερό) ως την κατάσταση κορεσμού του νερού. Γίνεται στους προθερμαντήρες και στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού.
- Στάδιο ατμοποίησης: το κορεσμένο νερό ατμοποιείται πλήρως ούτως ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό. Συντελείται στον ατμοποιητή, ο οποίος δίνει την λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης ανάλογα με την πίεση του τροφοδοτικού νερού.
- Στάδιο υπερθέρμανσης: ο κορεσμένος ατμός, που έχει παραχθεί στον ατμοποιητή, εισέρχεται στον υπερθερμαντή και θερμαίνεται μέχρι την υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου. Αν ο κύκλος είναι κύκλος κορεσμένου νερού τότε δεν υπάρχει υπερθερμαντής

**Διεργασία 3-4** όπου ο ατμός (κορεσμένος στον κύκλο κορεσμένου ατμού, υπέρθερμος στον κύκλο του υπέρθερμου ατμού) οδηγείται και εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο. Κατά την εκτόνωση μειώνεται η θερμοκρασία και η πίεση του ατμού. Η πίεση εξόδου καθορίζεται από το κενό του συμπυκνωτή. Ανάλογα με την πίεση εξόδου μπορεί να παρουσιαστεί και μερική συμπύκνωση.

**Διεργασία 4-1** όπου ο υγρός ατμός χαμηλής πίεσης οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου ψύχεται σε (περίπου) σταθερή πίεση και μετατρέπεται σε κορεσμένο υγρό. Η πίεση και η

θερμοκρασία που επικρατούν στον συμπυκνωτή καθορίζονται από την θερμοκρασία των ψυκτικών αγωγών και περυγίων. Οι ψυκτικοί αγωγοί μπορεί να διαρρέονται από αέρα (αεριοψυκτος συμπυκνωτής) ή από νερό (υδροψυκτος συμπυκνωτής).



Σχήμα 3.4: Ιδανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση

Όπου:

- 1-2: Προθέρμανση νερού μέχρι θερμοκρασίας ζέσης
- 2-3: Ατμοποίηση
- 3-4: Υπερθέρμανση
- 4-1: Εκτόνωση ατμού στο στρόβιλο

Στον ιδανικό κύκλο Rankine η συμπίεση στις αντλίες και η εκτόνωση στον αμοστρόβιλο θεωρούνται ισεντροπικές δηλαδή ότι η εντροπία<sup>1</sup> του συστήματος παραμένει σταθερή, όπως επίσης θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης στον αμοσπαραγωγό και στον συμπυκνωτή. Ωστόσο στην πραγματικότητα αυτές οι μεταβολές δεν είναι ισεντροπικές, είναι μη αναστρέψιμες και αυτό σημαίνει ότι η αντλία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από την ιδανική αντλία και ο στρόβιλος αποδίδει λιγότερη ενέργεια από τον ιδανικό στρόβιλο. Εκτός αυτού, η απόδοση του αμοστρόβιλου επηρεάζεται από τον σχηματισμό σταγονιδίων νερού. Κατά την εκτόνωση του ατμού ένα μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και σχηματίζονται σταγονίδια, τα οποία προσκρούουν στον αμοστρόβιλο με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας διάβρωση αλλά και μειώνοντας την αποδοτικότητα του στροβίλου. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο υπερθερμαίνεται ο ατμός ή γίνεται αναθέρμανση. Ακόμα οι τελευταίες βαθμίδες του στροβίλου έχουν ιδιαίτερο σχεδιασμό ενώ υπάρχουν σημεία στο κέλυφος του στροβίλου όπου συγκεντρώνεται και απομακρύνεται τυχόν συμπυκνωμένο νερό.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine ισούται με  $\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{απορριπτόμενο}}{Q_{προσφέρομενο}}$

<sup>1</sup> Εντροπία: Σύμφωνα με την κλασική θερμοδυναμική, εκφράζει τη δυνατότητα ενός συστήματος να παράγει μηχανικό έργο (όσο μικρότερη η εντροπία, τόσο μεγαλύτερη η δυνατότητα του συστήματος να παράγει μηχανικό έργο)

### 3.2 Λειτουργικά στοιχεία ενός Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ)

Τα επιμέρους τμήματα των ΑΗΣ είτε αυτοί είναι πυρηνικοί είτε συνδυασμένου κύκλου είναι κοινά όσον αφορά το κομμάτι της ατμοπαραγωγής. Έχουμε λοιπόν τα εξής μέρη:

- α) Ατμοπαραγωγός
- β) Αντλίες
- γ) Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό
- δ) Συμπυκνωτές και πύργοι ψύξης
- ε) Απαερωτής
- ς) Ατμοστρόβιλος

#### α) Ατμοπαραγωγός

Το σημαντικότερο κομμάτι ενός Ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ) είναι ο ατμοπαραγωγός. Στις πρώτες κατασκευές ατμοπαραγωγών, το εργαζόμενο μέσο (νερό/ατμός) βρισκόταν στο εσωτερικό ενός μεγάλου κυλινδρικού δοχείου (τυμπάνου), ενώ το καυσαέριο κυκλοφορούσε στο εξωτερικό του δοχείου και μέρος της εξωτερικής επιφάνειας αποτελούσε την θερμαινόμενη επιφάνεια του ατμοπαραγωγού. Ωστόσο, επειδή αυτές οι κατασκευές είχαν ελάχιστη θερμαινόμενη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, είχαν μικρό βαθμό απόδοσης, λόγω της μικρής θερμικής εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας και έδιναν μικρές παροχές ατμού, ενώ ταυτόχρονα ήσαν δαπανηρές. Ακόμα ο ατμός ήταν μικρής πίεσης και θερμοκρασίας, λόγω περιορισμών από την ίδια την κατασκευή.

Επόμενες προσπάθειες κατασκευής ήταν ο ατμοπαραγωγός μέσω φλογοσωλήνα, όπου στο εσωτερικό του τυμπάνου βρίσκεται σωλήνας μέσα στον οποίο γίνεται η καύση και αποτελεί την πρώτη διαδρομή του καυσαερίου, ο ατμοπαραγωγός με φλογοσωλήνα και αεριαλούς, παρόμοιος με τον προηγούμενο αλλά στους αεριαλούς το καυσαέριο ρέει σε δεύτερη ή και τρίτη διαδρομή, ενώ υπήρξαν και παραλλαγές των παραπάνω τύπων, π.χ. ατμοπαραγωγός μόνο με αεριαλούς.

Όλοι οι ατμοπαραγωγοί που περιγράφηκαν παραπάνω χαρακτηρίζονται από μεγάλο υδροθάλαμο, που ένα μέρος της εξωτερικής του επιφάνειας αποτελεί επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας μεταξύ καυσαερίου και νερού. Η εγκατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται από μικρή θερμαινόμενη επιφάνεια, ανά μονάδα όγκου της εγκατάστασης. Εξαιτίας αυτού οι ατμοπαραγωγοί αυτοί είναι ακατάλληλοι για υψηλές τιμές ατμοπαραγωγής γιατί συνεπάγονται τεράστιες κατασκευές μεγάλου κόστους. Πέρα από αυτό και η πίεση του παραγόμενου ατμού είναι πολύ μικρή, καθώς μεγάλη πίεση συνεπάγεται μεγάλη πάχη ελάσματος τυμπάνου και φλογοσωλήνα που σημαίνει ογκώδη και δαπανηρή κατασκευή.

Επίσης ο τρόπος συγκρότησής τους κάνει τον ατμοπαραγωγό ακατάλληλο για θερμικές φορτίσεις και καταπονήσεις. Γι' αυτούς τους λόγους όλοι οι ατμοπαραγωγοί αυτοί αντικαταστάθηκαν, τουλάχιστον στις μεγάλες μονάδες, με κατασκευές βασισμένες σε τελείως διαφορετικές αρχές.

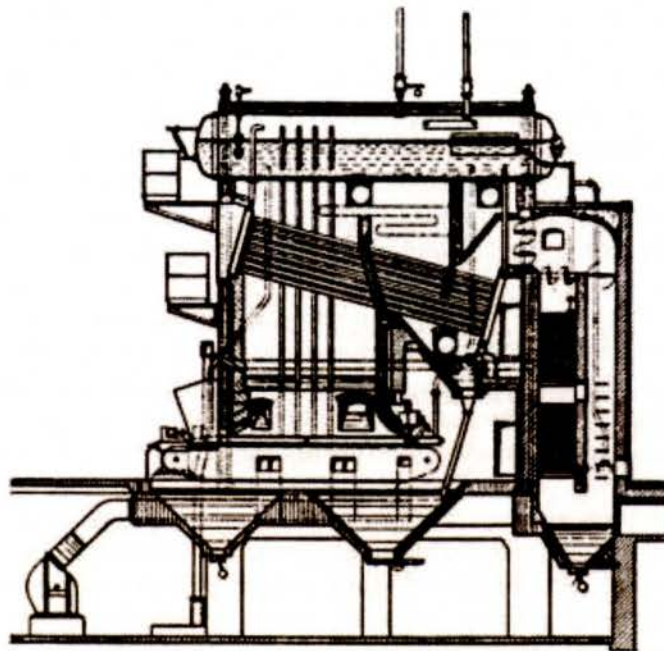
#### α1) Υδραυλωτός ατμοπαραγωγός

Στους νέους ατμοπαραγωγούς, ολόκληρη η επιφάνεια συναλλαγής αποτελείται από πλήθος σωλήνων μικρής διαμέτρου, μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το ατμοποιούμενο νερό ή ο υπερθερμαινόμενος ατμός, ενώ στο εξωτερικό κυκλοφορεί το καυσαέριο και γι' αυτό τον λόγο ονομάστηκαν υδραυλωτοί. Πλεονεκτούν έναντι των παλαιών ως προς:

- Μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου περιεχόμενου νερού, με συνέπεια, μεγάλη συνεχής παροχή ατμού για μικρό σχετικά όγκο της εγκατάστασης
- Επίτευξη μικρών χρόνων ατμοποίησης

- Δυνατότητα παραγωγής ατμού μεγάλης πίεσης με σχετικά μικρά απαιτούμενα πάχη σωλήνων, λόγω της μικρής διαμέτρου.
- Ελαστικότητα κατασκευής και δυνατότητα μεγάλων θερμικών φορτίσεων
- Βελτίωση βαθμού απόδοσης ατμοπαραγωγού, λόγω πληρέστερης εκμετάλλευσης της θερμότητας του καυσαερίου, αλλά και καλύτερης λειτουργίας όλου του θερμοδυναμικού κύκλου λόγω αυξημένων πιέσεων και θερμοκρασιών.
- Μικρό κόστος κατασκευής επειδή το υλικό κατασκευής είναι φθηνό αλλά και το κόστος συγκρότησης είναι σχετικά μικρό.

Οι υδραυλωτοί ατμοπαραγωγοί συνεχίζουν να έχουν τύμπανο αλλά αυτό έπαψε να είναι μέρος της θερμαινόμενης επιφάνειας και ο ρόλος του περιορίστηκε στην αποθήκευση του νερού και στον διαχωρισμό του νερού από τον ατμό.



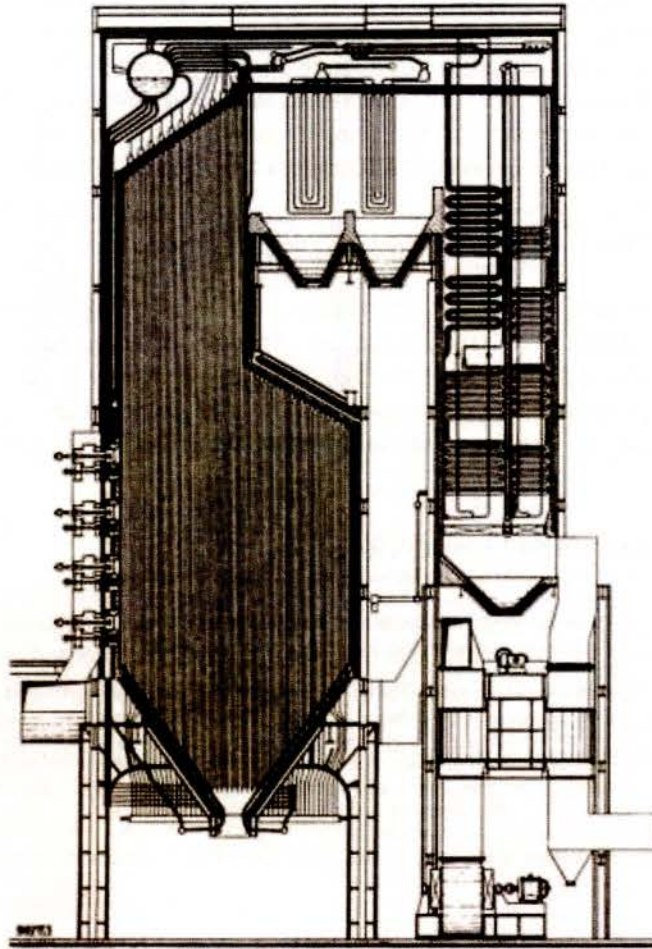
*Σχήμα 3.5: Υδραυλωτός ατμοπαραγωγός με στοιχεία και υδροθάλαμο τοποθετημένο κατά μήκος*

## **α2) Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς**

Αυτού του τύπου ο ατμοπαραγωγός αποτελείται από κυλινδρικά τύμπανα, υδραυλούς και συλλέκτες (χαλύβδινα δοχεία κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής στα οποία συγκεντρώνεται το περιεχόμενο ορισμένων υδραυλών και στην συνέχεια διαμοιράζεται σε άλλη ομάδα υδραυλών). Το τροφοδοτικό νερό μετά την προθέρμανσή του οδηγείται στο κύριο υδροθάλαμο απ' όπου με σωλήνες μεγάλης σχετικά διατομής με μέτρια ή και χωρίς θερμική φόρτιση, κατεβαίνει προς τους συλλέκτες. Από τους συλλέκτες διαμοιράζεται στους υδραυλούς ατμοποίησης, οι οποίοι μετά την θέρμανση, το οδηγούν ως πλούσιο σε υδρατμό μείγμα, πίσω στον υδροθάλαμο.

Κάθε υδραυλός επικοινωνεί κατευθείαν με το εσωτερικό του αντίστοιχου συλλέκτη και υδροθαλάμου, πάνω στους οποίους είναι στεγανά συγκολλημένος. Με τον τρόπο αυτό ο κατασκευαστής έχει μεγαλύτερη ευχέρεια στη διαμόρφωση του ατμοπαραγωγού και τη διάταξη της επιφάνειας συλλογής θερμότητας. Έτσι προκύπτει κατασκευή που αν στερεωθεί κατάλληλα έχει μεγάλη ελαστικότητα και ευκαμψία κατά την θέρμανση, εξαιτίας της δυνατότητας διαστολής των υδραυλών. Ως μειονέκτημα

όμως παρουσιάζεται το γεγονός του αυξημένου κόστους συντήρησης, αλλά και το γεγονός ότι θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη μια πληθώρα διαφορετικών ανταλλακτικών υδραυλών.



*Σχήμα 3.6: Ατμοπαραγωγός με ορθούς υδραυλούς*

Η παραπάνω κατηγορία αποτελεί και τους σύγχρονους ατμοπαραγωγούς. Οι σύγχρονοι ατμοπαραγωγοί ονομάζονται ατμοπαραγωγοί ακτινοβολίας καθώς ένα μεγάλο μέρος της αναγκαίας για την ατμοποίηση θερμότητας προσδίδεται στους σωλήνες που περιέχουν το εργαζόμενο μέσο με την μορφή ακτινοβολίας από το εργαζόμενο μέσο στον θάλαμο καύσης. Στους ατμοπαραγωγούς ακτινοβολίας ο θάλαμος καύσης επενδύεται μερικά ή ολικά με τους σωλήνες που αποτελούν την επιφάνεια ατμοποίησης.

Έτσι καθ' όλη την διάρκεια της καύσης η φλόγα και το παραγόμενο καυσαέριο ακτινοβολούν έντονα προς τους σωλήνες προσδίδοντάς τους μεγάλα ποσά θερμότητας για την ατμοποίηση. Η εισαγωγή της επένδυσης του θαλάμου με τους υδραυλούς είχε γίνει για την αντιμετώπιση της ψύξης των τοιχωμάτων του θαλάμου, αλλά το γεγονός ότι οι σωλήνες αυτοί απορροφούσαν μεγάλα ποσά θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας φλόγας και του καυσαερίου, οδήγησε στην χρησιμοποίηση αυτής της θερμότητας για την ατμοποίηση και καθιέρωσε τον ατμοπαραγωγό ακτινοβολίας, που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στις μεγάλες μονάδες. Οι σύγχρονοι ατμοπαραγωγοί εκτός από το σύστημα ατμοποίησης που έχει ήδη αναφερθεί, συμπεριλαμβάνουν και κάποια υποτήματα

### **α3) Υπερθερμαντήρες.**

Μετά τον ατμοποιητή ακολουθεί το σύστημα υπερθέρμανσης. Με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού. Ο υπερθερμαντήρας αποτελείται από ένα ή περισσότερα τμήματα (σερπαντίνες σωλήνων) που τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία στην ροή των καυσαερίων. Μεταξύ των τμημάτων του υπερθερμαντήρα τοποθετούνται ψύκτες ατμού, συνήθως με την ανάμειξη υπέρθερμου ατμού με τροφοδοτικό νερό, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του ατμού. Ανάλογα με την θέση τοποθέτησης του υπερθερμαντήρα και τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας γίνεται η διάκριση σε υπερθερμαντήρες ακτινοβολίας και σε υπερθερμαντήρες επαφής-μεταφοράς.

### **α4) Αναθερμαντήρες.**

Ο αναθερμαντής ατμού, είναι μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας που χρησιμεύει για την αναθέρμανση του ατμού μετά την μερική του αποτόνωση στον αμμοστρόβιλο. Η κατασκευή του αναθερμαντή είναι ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή, ενώ η θερμοκρασία εξόδου από τον αναθερμαντή είναι περίπου ίδια με αυτήν του υπερθερμαντή. Και εδώ γίνεται έλεγχος της θερμοκρασίας του ατμού με διάφορους τρόπους, όπως ψεκασμό νερού, επαναφορά ψυχρών καυσαερίων, εναλλάκτη θερμότητας κλπ.

### **α5) Προθερμαντήρες νερού \ οικονομητήρας.**

Ο προθερμαντήρας νερού προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού, πριν οδηγηθεί στο σύστημα ατμοποίησης. Η θερμότητα που φέρουν ακόμα τα καυσαέρια, τα οποία έχουν προσφέρει ήδη θερμότητα στις επιφάνειες του συστήματος ατμοποίησης, υπερθερμαντήρα και αναθερμαντήρα, αξιοποιούνται με την θέρμανση τροφοδοτικού νερού μέχρι θερμοκρασίας μικρότερης 30-50° C της θερμοκρασίας κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει για να αποφευχθεί ατμοποίηση στον οικονομητήρα σε περίπτωση μείωσης της πίεσης, κάτι που θα επέφερε ανομοιόμορφη κατανομή του μείγματος στους σωλήνες του συστήματος ατμοποίησης. Οι οικονομητήρες αποτελούνται από συλλέκτες εισόδου και εξόδου από σερπαντίνες χαλυβδοσωλήνων γυμνών ή με πτερύγια.

### **α6) Προθερμαντήρας αέρα καύσης.**

Η χρησιμοποίηση προθερμαντήρων αέρα καύσης, βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης του ατμοπαραγωγού, μειώνοντας τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (και κατά συνέπεια την απορριπτόμενη θερμότητα από αυτήν την οδό) και επίσης συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη και ταχύτερη διεργασία της καύσης ιδιαίτερα αν το καύσιμο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Η τελική θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον προθερμαντήρα αέρα εξαρτάται από το σημείο δρόσου των καυσαερίων και δεν πρέπει ποτέ να είναι μικρότερη από αυτήν, αλλιώς υπάρχει έντονος κίνδυνος διάβρωσης από συμπύκνωση θεικού οξέος (σε περίπτωση που χρησιμοποιείται καύσιμο με θείο). Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο τόσο μικρότερη είναι η επιτρεπόμενη μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του προθερμαντή αέρα. Υπάρχουν διάφοροι προθερμαντήρες αέρα, όπως προθερμαντήρες με πλάκες και προθερμαντήρες αέρα με σωλήνες. Οι προθερμαντήρες με σωλήνες αποτελούνται από σωλήνες που διέρχονται από τον χώρο εξαγωγής των καυσαερίων, μέσα στους οποίους διέρχεται ο αέρας καύσης για την προθέρμανσή του. Οι προθερμαντήρες με πλάκες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες περιστρεφόμενων πλακών και στους αναγεννητικούς προθερμαντήρες σταθερών πλακών.

Στην πρώτη κατηγορία η κατασκευή αποτελείται από μια περιστρεφόμενη συστοιχία πλακών που βρίσκονται σε ένα περίβλημα αποτελούμενο από δυο ή παραπάνω τμήματα. Τα χωρίσματα είναι σφραγισμένα ώστε να διατηρούν τις διαρροές αέρα στο ελάχιστο. Στο ένα τμήμα διέρχεται το

καυσαέριο και θερμαίνει τις πλάκες οι οποίες μετά βρίσκονται μέσα στο ρεύμα του αέρα θερμαίνοντάς το.

Στην δεύτερη περίπτωση, οι πλάκες δεν περιστρέφονται, αλλά αντίθετα αλλάζουν περιοδικά οι χώροι από τους οποίους διέρχεται ο αέρας και το καυσαέριο

### **α7) Ατμοπαραγωγός υπερκρίσιμων πιέσεων**

Η ιδέα της κατασκευής ατμοπαραγωγών με πίεση λειτουργίας πάνω από την κρίσιμη (221bar) στηρίχθηκε στην ιδιότητα του υδρατμού, ο οποίος στην κρίσιμη πίεση έχει θερμότητα ατμοποίησης μηδενική. Αυτό σημαίνει ότι αν το τροφοδοτικό νερό θερμανθεί στον ατμοπαραγωγό διατηρούμενο σε πίεση πάνω από την κρίσιμη, τότε θα μετασχηματιστεί αμέσως σε ατμό χωρίς να περάσει από την κατάσταση διφασικού μείγματος. Σε τέτοιου είδους ατμοπαραγωγούς δεν χρειάζεται και το τύμπανο, του οποίου σκοπός είναι ο διαχωρισμός υγρής και αέριας φάσης. Την παραπάνω ιδέα χρησιμοποίησε ο Benson, ο οποίος δημιούργησε έναν ατμοπαραγωγό που αποτελείται μόνο από σωλήνες και συλλέκτες.

Χαρακτηριστικό αυτού του ατμοπαραγωγού είναι ότι η προθέρμανση του νερού, η ατμοποίηση και η υπερθέρμανση συμβαίνουν σε μια διαδρομή του εργαζόμενου μέσου. Το σύστημα ατμοποίησης αποτελείται από σωληνοτοιχώματα, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων συλλεκτών. Οι σωλήνες στο σωληνοτοιχώμα μπορούν να τοποθετηθούν εναλλάξ υπό κλίση, κατακόρυφα ή υπό κλίση ανερχόμενη. Η υπό κλίση κατασκευή του σωληνοτοιχώματος έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ίδιου μήκους σωλήνων και της ίδιας θερμικής φόρτισης αφού κάθε σωλήνας θα διατρέχει τις ίδιες περιοχές θέρμανσης. Η ταχύτητα στους σωλήνες θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των τοιχωμάτων, αλλά και να αποφεύγονται διάφορα προβλήματα αστάθειας που μπορούν να προκύψουν στο σύστημα ατμοποίησης. Σε χαμηλό φορτίο πρέπει να τοποθετηθεί αντλία ανακυκλοφορίας, ενώ στο τέλος του συστήματος πρέπει να υπάρχει σύστημα διαχωρισμού νερού ατμού. Το νερό που δεν χρησιμοποιήθηκε επαναφέρεται πριν από τον προθερμαντήρα στην είσοδο του συστήματος ατμοποίησης. Κατά τις μεταβολές φορτίου μεταβάλλεται και το σημείο ατμοποίησης ενώ αν η παροχή καυσίμου μειωθεί πάρα πολύ μπορεί το τελικό σημείο ατμοποίησης να βρεθεί μέσα στο δοχείο διαχωρισμού. Λόγω της έλλειψης τυμπάνου, το οποίο αποτελεί και αποθήκη νερού για τον ατμοπαραγωγό, το περιεχόμενο του ατμοπαραγωγού είναι σχετικά μικρό με αποτέλεσμα ο ατμοπαραγωγός να είναι ευαίσθητος σε μεταβολές του φορτίου και να απαιτούνται ιδιαίτερες διατάξεις ρύθμισης του καυσίμου και του νερού.

Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ατμοπαραγωγού είναι:

- Φθινό κόστος
- Μεγάλη ατμοπαραγωγή
- Αύξηση της πίεσης λειτουργίας και πάνω από το κρίσιμο σημείο
- Μεγάλη ταχύτητα μεταβολής θερμοκρασιών
- Σταθερή θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού

### **β1) Αντλίες**

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός περιλαμβάνει πάρα πολλές αντλίες. Οι κυριότερες είναι:

**β1.1) Τροφοδοτικές αντλίες** που αντλούν το τροφοδοτικό νερό από την τροφοδοτική δεξαμενή και το καταθλίβουν στον ατμοπαραγωγό μέσω των προθερμαντών νερού υψηλής πίεσης. Αυτές οι αντλίες είναι υψηλής πίεσης και μπορεί να είναι φυγοκεντρικές ή θετικής εκτόπισης. Στην περίπτωση των φυγοκεντρικών αντλιών αυτές είναι πολυβάθμιες προκειμένου να φτάσουν την υψηλή πίεση που απαιτείται.

Είναι μεγάλης ισχύος και κινούνται από ηλεκτροκινητήρα που δεν είναι ενσωματωμένος στο κύριο σώμα της αντλίας αλλά είναι μηχανικά συνδεδεμένος με αυτήν, ενώ συνήθως τροφοδοτούνται από δυο ανεξάρτητες μεταξύ τους πηγές ενέργειας. Η αντλία πρέπει να υπερνικήσει την πίεση ατμού που σχηματίζεται στον ατμοπαραγωγό. Σε κάθε μονάδα γίνεται εγκατάσταση τριών ηλεκτροκίνητων αντλιών και κάθε αντλία μπορεί να παρέχει το 50% της αναγκαίας παροχής τροφοδοτικού νερού. Έτσι για το πλήρες φορτίο είναι αναγκαία η λειτουργία δυο αντλιών ενώ η τρίτη μένει σε εφεδρεία. Κατά τον υπολογισμό της πίεσης της τροφοδοτικής αντλίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι ακόλουθες αντιστάσεις:

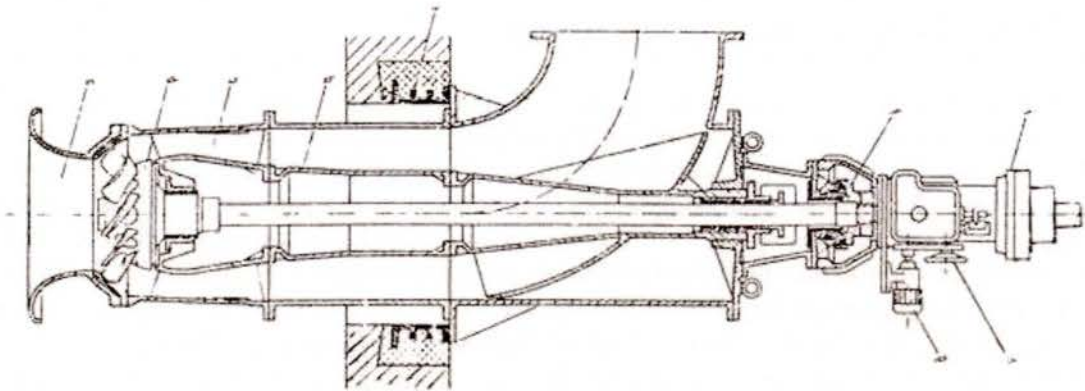
- Αντίσταση των σωλήνων μεταξύ αντλίας ατμοπαραγωγού
- Αντίσταση προθερμαντών νερού υψηλής πίεσης
- Αντίσταση απομονωτικών βαλβίδων και οργάνων
- Αντίσταση ρυθμιστικών βαλβίδων
- Αντιστάσεις μέσα στον ατμοπαραγωγό

Μια τροφοδοτική αντλία πρέπει να έχει όσο το δυνατό καλύτερο βαθμό απόδοσης σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη περιοχή φορτίου, γρήγορη εκκίνηση από ψυχρή και θερμή κατάσταση και όσο το δυνατό μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας.

**β1.2) Αντλίες συμπυκνώματος** που αντλούν το συμπύκνωμα από τον συμπυκνωτή και το καταθλίβουν μέσω των προθερμαντών χαμηλής πίεσης στον απαεριωτή και στην δεξαμενή τροφοδοτικού νερού. Κατά κανόνα εγκαθίστανται δυο αντλίες συμπυκνώματος μια εκ των οποίων είναι εφεδρική. Κάθε αντλία πρέπει να είναι σε θέση να αντλεί την μέγιστη ποσότητα συμπυκνώματος που μπορεί να προκύψει στις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας. Οι αντλίες συμπυκνώματος αντλούν νερό κοντά στην κατάσταση κορεσμού. Εάν η γεωδαιτική διαφορά ύψους μεταξύ της στάθμης του συμπυκνωτή και της αναρρόφησης της αντλίας δεν είναι αρκετή επέρχεται με τον σχηματισμό φυσαλίδων ατμού σπηλαιώση με καταστρεπτικές συνέπειες

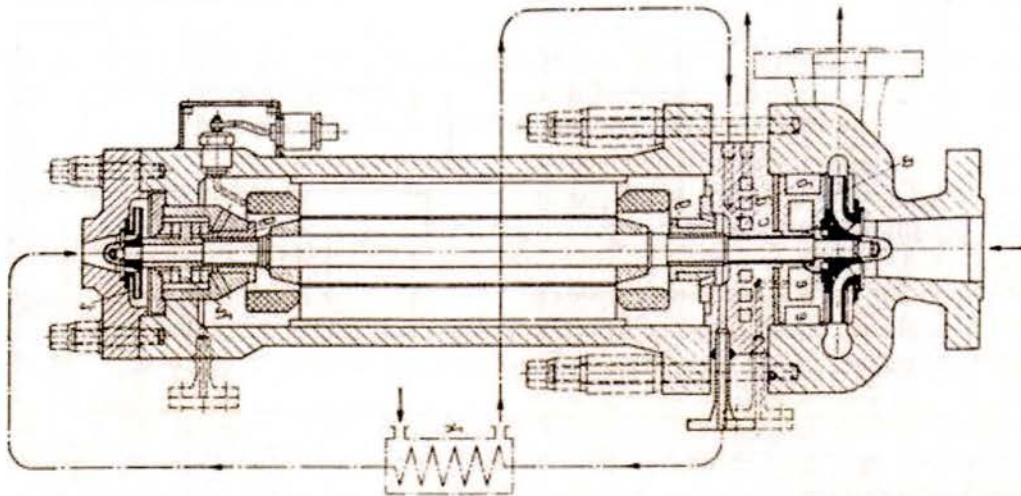
**β1.3) Αντλίες κυκλοφορίας ψυκτικού νερού**, που είναι οι υπεύθυνες για την κυκλοφορία του ψυκτικού νερού μέσα στον συμπυκνωτή της μονάδας. Η παροχή του ψυκτικού νερού καθορίζεται από το νερό που απαιτείται για την συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο. Το απαιτούμενο ψυκτικό νερό για τις υπόλοιπες λειτουργίες είναι περίπου το 5-10% του νερού για την ψύξη του συμπυκνωτή. Η πιο συνήθης διάταξη αυτών των αντλιών είναι δυο αντλίες κάθε μια από τα οποίες διακινεί τα 2/3 της συνολικής παροχής. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται στους μεγάλους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι τύπου έλικας και συνήθως τοποθετούνται κάτω από την στάθμη του νερού για την εξοικονόμηση χρημάτων για την κατασκευή ειδικών στεγανών χώρων για την εγκατάστασή τους. Είναι συνήθως κατακόρυφου άξονα και για την περιστροφή τους χρησιμοποιούνται τριφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με ή χωρίς μειωτή στροφών ανάλογα με τις στροφές της αντλίας. Μπορούν να ρυθμίζονται εύκολα χωρίς απώλειες με μεταβολή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων.





Σχήμα 3.7: Αντλία ψυκτικού μέσου

**β.1.4) Αντλίες ανακυκλοφορίας** νερού ατμοπαραγωγού σε περίπτωση ατμοπαραγωγών τεχνητής κυκλοφορίας ή ατμοπαραγωγών τύπου Benson-Sulzer με διάταξη εκκίνησης με αντλίες ανακυκλοφορίας. Οι αντλίες αυτές λειτουργούν σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις στην αναρρόφηση ενώ η πίεση στην αντλία αυξάνει κατά 2,5bar περίπου. Για πιέσεις μεγαλύτερες των 120bar δεν χρησιμοποιούνται στυπιθλίπτες και χρησιμοποιείται κινητήρας υγρού δρομέα, όπου το εσωτερικό του κινητήρα της αντλίας βρίσκεται στην πλήρη πίεση του νερού του ατμοπαραγωγού. Επειδή είναι αναγκαία η προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων του κινητήρα, χρησιμοποιείται ένα θερμικό φράγμα από διακινούμενο (από μια μικρότερη αντλία) ψυκτικό νερό.



Σχήμα 3.8: Αντλία ανακυκλοφορίας

Ενώ υπάρχουν και κάποιες άλλες αντλίες για τις δευτερεύουσες λειτουργίες του σταθμού όπως:

- Αντλίες νερού δικτύου πυρκαγιάς
- Αντλίες κυκλοφορίας νερού κλειστών κυκλωμάτων ψύξης
- Αντλίες διακίνησης αφαλατωμένου νερού στο σύστημα χημικής ή θερμικής κατεργασίας του νερού
- Αντλίες διακίνησης διαφόρων χημικών ουσιών
- Αντλίες απόνερων
- Αντλίες δημιουργίας κενού στον συμπυκνωτή
- Αντλίες του συστήματος απομάκρυνσης τέφρας
- Αντλίες ελαίου λίπανσης και στεγανοποίησης
- Άλλες αντλίες.

### γ) Προθερμαντής τροφοδοτικού νερού με ατμό

Πριν την είσοδο του νερού στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού πολλές φορές το νερό προθερμαίνεται με την χρήση προθερμαντήρων με ατμό. Ο ατμός αυτός προέρχεται από απομάστευση από τον ατμοστρόβιλο της εγκατάστασης σε κατάλληλη πίεση ούτως ώστε να έχει την κατάλληλη θερμοκρασία. Επομένως ένα ποσοστό της ατμοπαραγωγής δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή έργου αλλά για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Με κατάλληλο σχεδιασμό αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι: Προσδίδεται λιγότερη θερμότητα εξωτερικά για ατμοποίηση και οι σταδιακές προθερμάνσεις (που είναι απαραίτητες για να αποφευχθούν οι θερμικές τάσεις λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ εξόδου του συμπυκνωμένου νερού από τον συμπυκνωτή και εισόδου θερμών καυσαερίων στον οικονομητήρα) έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνεται η μη αντιστρεπτότητα της μεταφοράς θερμότητας, αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μπορεί να γίνει σε ανοικτούς ή κλειστούς προθερμαντές. Στους ανοικτούς προθερμαντές ο ατμός αναμειγνύεται άμεσα με το προς προθέρμανση τροφοδοτικό νερό. Ένα παράδειγμα ανοικτού προθερμαντή είναι ο απαερωτής. Οι κλειστοί προθερμαντές είναι ουσιαστικά εναλλάκτες θερμότητας στους οποίους συμπυκνώνεται ατμός προσδίδοντας θερμότητα στο νερό, ενώ είναι πιθανό να υποψυχθεί το συμπύκνωμα δίνοντας επιπλέον θερμότητα για την προθέρμανση του νερού. Το συμπύκνωμα που προκύπτει μπορεί είτε να οδηγηθεί στον συμπυκνωτή (συμπυκνώματα οδηγούνται πίσω), είτε με αντλίες να αυξηθεί η πίεσή του και να αναμειχθεί με το τροφοδοτικό νερό (συμπυκνώματα οδηγούνται εμπρός).

### δ) Συμπυκνωτές

Ο συμπυκνωτής χρησιμεύει για να συμπυκνώσει τον ατμό που βγαίνει από τον στρόβιλο, με σκοπό το συμπυκνούμενο νερό να ξαναχρησιμοποιηθεί από τον ατμοπαραγωγό. Ο λόγος που το νερό ξαναχρησιμοποιείται είναι γιατί το νερό αυτό είναι υψηλής καθαρότητας, απαλλαγμένο από άλατα ( πράγμα που σημαίνει αποφυγή διαβρώσεων ή επικαθήσεων) και εκ του λόγου αυτού είναι ασύμφορο να αποσυρθεί από την διαδικασία. Πρακτικά ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου ατμός με χαμηλή πίεση συμπυκνώνεται με την βοήθεια ψυκτικού μέσου, που μπορεί να είναι νερό ή αέρας. Όσο χαμηλότερη είναι η πίεση του συμπυκνωτή τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του ατμοστρόβιλου καθώς αυξάνεται η ενθαλπική πτώση στον στρόβιλο. Επομένως ο συμπυκνωτής είναι βασικό τμήμα της εγκατάστασης, αλλά παράλληλα αποτελεί και την μέγιστη θερμική απώλεια ενός θερμικού σταθμού καθώς η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης απάγεται από το νερό ψύξης.

Η πίεση του συμπυκνωτή εξαρτάται από την θερμοκρασία συμπύκνωσης που με την σειρά της καθορίζεται από την θερμότητα του ψυκτικού μέσου και την μετάδοση θερμότητας. Κατά τις εκκινήσεις, κρατήσεις καθώς και σε ξαφνικές πτώσεις φορτίου ένα μέρος του ατμού παρακάμπτει τον στρόβιλο και εισέρχεται απ' ευθείας στον συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται απώλειες συμπυκνώματος ή το άνοιγμα των ασφαλιστικών βαλβίδων. Ακόμα ο συμπυκνωτής χρησιμοποιείται σαν δεξαμενή συγκέντρωσης των συμπυκνωμάτων του στρόβιλου, των προθερμαντών και του νερού συμπλήρωσης του κυκλώματος νερού - ατμού της εγκατάστασης.

Τμήματα του συμπυκνωτή:

- Κυρίως συμπυκνωτής
- Αντλίες ψυκτικού νερού ή ανεμιστήρες ψυκτικού αέρα
- Αντλίες συμπυκνώματος
- Συσσκευή αναρρόφησης του αέρα και δημιουργίας κενού
- Σωλήνες βαλβίδες κ.λπ.

### δ.1) Ψυκτικό μέσο

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες συμπυκνωτών ανάλογα με το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιούν:

- Άμεσα αερόψυκτοι
- Έμμεσα αερόψυκτοι
- Άμεσα υδρόψυκτοι

Στους άμεσα αερόψυκτους δεν απαιτείται καθόλου νερό, αλλά η παραγόμενη ισχύς και ο βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός καθώς τα επίπεδα κενού δεν είναι τόσο χαμηλά, λόγω μειωμένης μετάδοσης θερμότητας. Ωστόσο χρησιμοποιούνται σε ξηρές και άνυδρες περιοχές. Στους άμεσα υδρόψυκτους απαιτείται νερό για την ψύξη του συμπυκνωτή. Αυτού του τύπου ο συμπυκνωτής χρησιμοποιείται σε περιοχές πλούσιες σε νερό. Το νερό αφού διέλθει από τον συμπυκνωτή ψύχοντάς τον αποβάλλεται στην πηγή από την οποία προήλθε (ποτάμι, λίμνη κ.λπ.).

### δ.2) Πύργος Ψύξης

Οι πύργοι ψύξης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στους υγρούς πύργους ψύξης και στους ξηρούς πύργους ψύξης. Οι υγροί πύργοι ψύξης είναι μια δεξαμενή νερού σχήματος τετραγωνικού ή σφηνοειδούς κυλινδρικού. Το νερό εισέρχεται σε ανώτερα τμήματα της δεξαμενής όπου και κατανέμεται σε μεγάλο αριθμό καναλιών, απ' όπου με μικρές σπές πέφτει σε δίσκους διασκορπισμού ή σε κυματοειδείς επιφάνειες, ενώ η επιφάνειά του έρχεται σε άμεση επαφή με τον αέρα που εισέρχεται από το κάτω μέρος.



*Σχήμα 3.9: Πύργος ψύξης φυσικής λειτουργίας, μονάδα V ΑΗΣ Λαυρίου*

Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση μέρους του νερού με αποτέλεσμα το υπόλοιπο να ψύχεται. Λόγω του γεγονότος ότι μέρος του νερού εξατμίζεται χρειάζεται συνεχής αναπλήρωση του νερού στο κύκλωμα ψύξης. Στους πύργους ψύξης φυσικής κυκλοφορίας ο πύργος έχει πολύ μεγάλο ύψος (έως και 200 μέτρα ύψος) και ο αέρας κινείται λόγω διαφοράς πίεσης στο κάτω και στο πάνω μέρος της κατασκευής και λόγω του σχήματος του πύργου (που μοιάζει από κάτω προς τα πάνω με συγκλίνον ακροφύσιο). Στους πύργους ψύξης εξαναγκασμένης κυκλοφορίας η κυκλοφορία του αέρα γίνεται με ανεμιστήρες που ωθούν τον αέρα διαμέσου του πύργου. Σημειώνεται ότι το νερό που απαιτείται για αναπλήρωση είναι πολύ λιγότερο από το νερό που απαιτείται στην περίπτωση της άμεσης ψύξης.

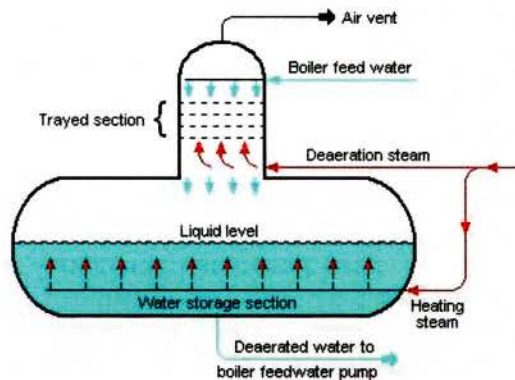
Στους ξηρούς πύργους ψύξης το χρησιμοποιούμενο νερό για την ψύξη του συμπυκνωτή δεν εξατμίζεται αλλά απλά ψύχεται στον πύργο ψύξης που λειτουργεί σαν εναλλάκτης θερμότητας. Τα δυο ρεύματα δεν έρχονται σε άμεση επαφή αλλά μόνο μέσω μιας επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι δεν χρειάζεται συνεχής αναπλήρωση νερού του ψυκτικού κυκλώματος και γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άνυδρα κλίματα. Η ροή του αέρα γίνεται με φυσική ή με βεβιασμένη κυκλοφορία. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτού του τύπου πύργων ψύξης είναι το σχετικά μεγαλύτερο κόστος και η μεγάλη απαιτούμενη επιφάνεια για την συναλλαγή θερμότητας. Οι συμπυκνωτές που ψύχονται από νερό είναι συνήθως τύπου κελύφους-σωλήνα (shell and tube). Δηλαδή αποτελούνται από ένα κέλυφος μέσα στο οποίο διέρχονται οι σωλήνες του ψυκτικού. Σημειώνεται πως στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου απαιτείται μικρότερη ποσότητα νερού από ότι για ένα καθαρά ατμοηλεκτρικό σταθμό, ίδιας ονομαστικής ισχύος και τούτο γιατί περίπου το 1/3 της συνολικά παραγόμενης ισχύος οφείλεται στον ατμοστρόβιλο.

### ε) Απαερίωτής

Η απαερίωση είναι μια διαδικασία απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του ατμοπαραγωγού προκειμένου να απαλλάξει το νερό από αέριες διαλυμένες ουσίες που μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση. Γενικά ονομάζουμε απαερίωση την διαδικασία με την οποία απομακρύνονται από το νερό διαλυμένα αέρια, η παρουσία των οποίων θα προκαλούσε επικίνδυνες διαβρώσεις σε σωλήνες, τύμπανα, συλλέκτες και προθερμαντήρες νερού. Αυτά τα αέρια είναι το οξυγόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και το χλώριο. Το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι διαλυμένα στο φυσικό νερό μαζί με άλλα αδρανή αέρια, όπως άζωτο. Το χλώριο βρίσκεται σε νερό που έχει υποστεί διαδικασία απομάκρυνσης των βλαβερών μικροοργανισμών. Η σπουδαιότερη μέθοδος απαερίωσης είναι η θερμική απαερίωση. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου βασίζεται στο ότι η διαλυτότητα των αερίων στο νερό ελαττώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Σύμφωνα με τους νόμους του Henry και του Dalton η διαλυτότητα ενός αερίου στο νερό είναι κατευθείαν ανάλογη της μερικής πίεσης του αερίου στο νερό. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η πίεση του υδρατμού και μειώνονται έτσι οι μερικές πιέσεις των διαλυμένων αερίων. Στο σημείο βρασμού η πίεση υδρατμού είναι τόσο υψηλή ώστε οι μερικές πιέσεις των αερίων να είναι μηδενικές. Έτσι θερμαίνεται το νερό μέχρι την θερμοκρασία βρασμού, οπότε μηδενίζεται η διαλυτότητα των αερίων και τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν. Τα αέρια μπορούν να εξέλθουν μόνον από την εξωτερική επιφάνεια του νερού που βρίσκεται σε κατάσταση βρασμού. Για τον λόγο αυτό σε μια εγκατάσταση θερμικής απαερίωσης θα πρέπει να δημιουργείται όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια νερού. Αύξηση της επιφάνειας του νερού γίνεται με καταιονισμό και διασκορπισμό του νερού ώστε να δημιουργηθούν σωματίδια. Έτσι τα αέρια μπορούν να απομακρυνθούν γρήγορα, εφόσον το νερό έχει θερμανθεί αρκετά.

### ε1) Απαερίωτής ανάμειξης με πτώση νερού.

Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος θερμικού απαεριωτή. Το νερό εισέρχεται στην κεφαλή του απαεριωτή, όπου με την βοήθεια ακροφυσίων ή άλλης διάταξης κατανέμεται σ' όλη την διατομή του κυλίνδρου του απαεριωτή. Με την τοποθέτηση κατάλληλων διαφραγμάτων επιβραδύνεται η πτώση του νερού, ενώ συγχρόνως διασπάται σε όλο και μικρότερα σταγονίδια. Έτσι προκύπτει μεγάλη επιφάνεια νερού που μεταβάλλεται συνέχεια. Η διαδρομή διάχυσης των αερίων προς την επιφάνεια είναι πολύ μικρή και έτσι μπορούν εύκολα τα αέρια να απομακρυνθούν από το νερό. Σε αντίθετη ροή προς το νερό δηλαδή από κάτω προς τα πάνω ρέει υπέρθερμος ατμός ο οποίος προθερμαίνει το νερό μέχρι το σημείο βρασμού. Μια καλή απαερίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η θερμοκρασία του νερού είναι το πολύ 15°C περίπου κάτω από το σημείο βρασμού. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ικανοποιητική ροή ατμού από κάτω προς τα άνω ενώ τα αέρια με μια ποσότητα ατμού εξέρχονται από την κεφαλή του απαεριωτή. Το απαεριωθέν νερό συγκεντρώνεται στην τροφοδοτική δεξαμενή κάτω από ένα στρώμα ατμού. Εάν έχουμε υψηλές απαιτήσεις για τροφοδοτικό νερό, τότε υπάρχει στην τροφοδοτική δεξαμενή μια επιπλέον εγκατάσταση παροχής ατμού. Με αυτόν τον τρόπο το νερό διατηρείται σε κατάσταση κορεσμού. Η εγκατάσταση αυτή χρησιμεύει και για προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού μέχρι το σημείο βρασμού.



Σχήμα 3.10: Απαεριοτής ανάμειξης με πτώση νερού

### ζ) Ατμοστρόβιλος

Ο ατμοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή που απορροφά θερμική ενέργεια από τον ατμό και την μετατρέπει σε χρήσιμη μηχανική ενέργεια. Έχει εκτοπίσει πλήρως την παλινδρομική μηχανή ατμού επειδή έχει πολύ μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος.

Επίσης παράγει άμεσα κυκλική κίνηση, χωρίς να χρειάζεται κάποιον μηχανισμό μετατροπής της κίνησης από παλινδρομική σε περιστροφική. Έτσι είναι κατάλληλος για την σύνδεση με ηλεκτρική γεννήτρια. Όπως και ο στρόβιλος των αεριοστρόβιλων έτσι και αυτός αποτελείται από στοιχειώδεις βαθμίδες που συνίστανται σε μια σταθερή και μια κινητή πτερύγωση.



Σχήμα 3.11: Αντικατάσταση πτερυγίων ενός Ατμοστρόβιλου

Ανάλογα με τον τύπο των πτερυγώσεων που χρησιμοποιούνται, υπάρχει και η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση των ατμοστρόβιλων. Ο σχεδιασμός της κινητής και σταθερής πτερύγωσης ενός στρόβιλου στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής. Χαρακτηριστικό των πτερυγώσεων είναι ο βαθμός αντίδρασης. Με βάση τον βαθμό αντίδρασης μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους βαθμίδων, τις βαθμίδες δράσης και αντίδρασης. Ο βαθμός αντίδρασης ορίζεται ως η ενθαλπική πτώση που συμβαίνει στην κινητή πτερύγωση (στάτορα) προς την συνολική ενθαλπική πτώση όλης της βαθμίδας ενώ ταυτόχρονα δηλώνει που γίνεται η μεταβολή της πίεσης. Έτσι στους στρόβιλους δράσης

ο βαθμός αντίδρασης είναι κοντά στο 0 και η μεταβολή πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη στην σταθερή πτερύγωση. Τέτοιοι ατμοστρόβιλοι είναι οι:

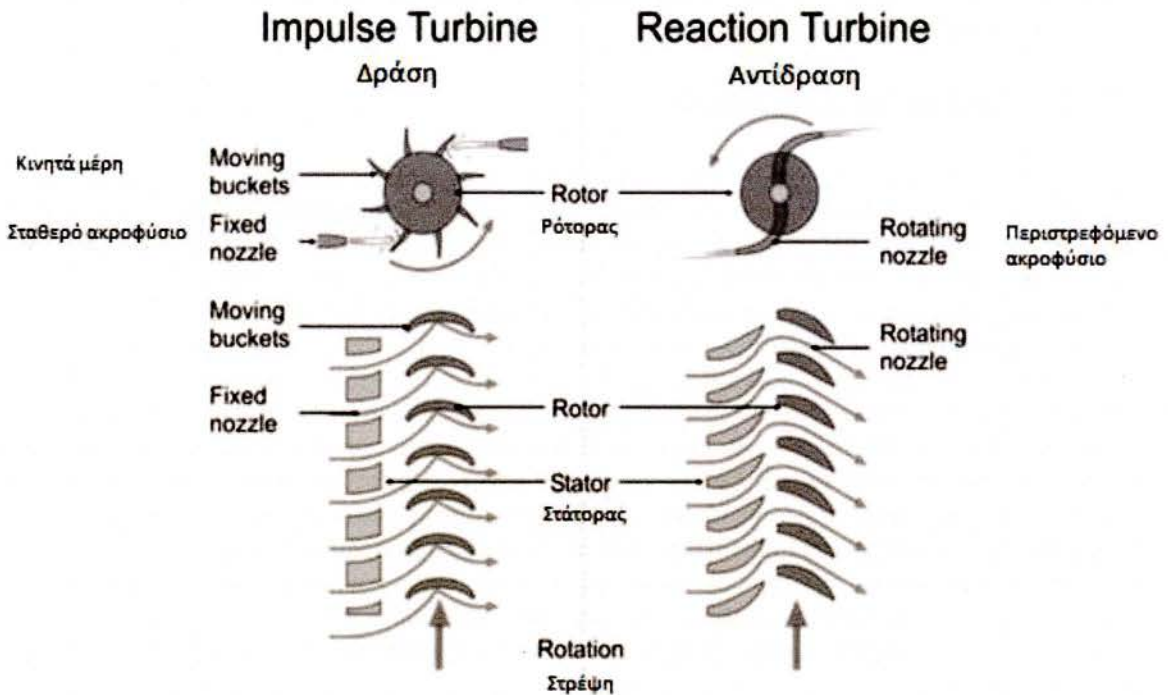
- Μονοβάθμιοι στρόβιλοι δράσης
- Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)
- Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

Στους στρόβιλους δράσης (ισόθλιπτοι, impulse turbines) η μορφή των σταθερών πτερυγίων είναι τέτοια ούτως ώστε να σχηματίζουν ακροφύσια και να επιταχύνουν την ροή, ελαττώνοντας την πίεση. Η ροή αφού εξέλθει από την σταθερή πτερύγωση προσπίπτει στην κινητή πτερύγωση και ωθεί τα πτερύγιά της με δύναμη που ασκεί σε αυτά λόγω μεταβολή της ορμής του ρευστού και μόνο. Η δύναμη που προκαλείται οφείλεται στην μεταβολή της κατεύθυνσης της ροής, χωρίς να μεταβάλλεται η σχετική ταχύτητα της πτερωτής. Κατά την διόδο του ρευστού μέσω των κινούμενων πτερυγίων δεν έχουμε μεταβολή της στατικής πίεσης μεταξύ της εισόδου και της εξόδου του ρότορα. Στους στρόβιλους με βαθμό αντίδρασης μεγαλύτερο του μηδενός (υπέρθλιπτοι, reaction turbines), ανάλογα με τον βαθμό αντίδρασης έχουμε πτώση πίεσης τόσο στο ρότορα όσο και στο στάτορα.

Σε έναν αξονικό στρόβιλο με βαθμό αντίδρασης 100% τα σταθερά πτερύγια μεταβάλλουν την γωνία ροής χωρίς μεταβολή της πίεσης η οποία γίνεται αποκλειστικά στα κινητά πτερύγια, που δημιουργούν συγκλίνοντα ακροφύσια, επιταχύνοντας τη ροή και ασκώντας δύναμη αντίδρασης που περιστρέφει τα κινητά πτερύγια. Οι δυο μηχανισμοί ανάπτυξης δύναμης πάνω στα πτερύγια δεν έχουν φυσική διαφορά, καθώς ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται δυνάμεις στις αεροτομές είναι ουσιαστικά ο ίδιος. Αυτός ο διαχωρισμός έχει παραμείνει από τις πρώτες μηχανές που αναπτύχθηκαν και λόγω του γεγονότος ότι ο τύπος της κάθε βαθμίδας συνδέεται με ιδιότητες που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Στην πράξη έχουμε πάντα συνδυασμό και των δυο μηχανισμών εξάσκησης δυνάμεων πάνω στις πτερυγώσεις.

<b>Στρόβιλος δράσης</b>		<b>Στρόβιλος αντίδρασης</b>	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εκμετάλλευση διαθέσιμης ενθαλπικής πτώσης σε λίγες βαθμίδες	Δαπανηρή κατασκευή διαφραγμάτων	Φθηνή κατασκευή	Απαίτηση μικρών αξονικών και ακτινικών διακένων
Τήρηση μεγάλων διακένων από την κινητή στεφάνη	Υψηλός αριθμός στροφών για την επίτευξη καλής απόδοσης	Πολύ καλή ροή ατμού	Δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας
Ταχεία εκκίνηση του στρόβιλου		Καλός βαθμός απόδοσης στις μικρές στροφές	Μεγάλες αξονικές ώσεις
Πολύ καλή στεγανότητα στο διάφραγμα			Μεγάλες απώλειες ατμού στις αξονικές βαθμίδες
			Μεγάλος αριθμός βαθμίδων

**Πίνακας 3.4:** Σύγκριση στρόβιλου δράσης και αντίδρασης



Σχήμα 3.12: Βαθμίδες δράσης και αντίδρασης

Μια επιπλέον κατηγοριοποίηση είναι με βάση τις συνθήκες τροφοδοσίας και τη ροή ατμού. Έχουμε λοιπόν τις εξής κατηγορίες στρόβιλων:

- **Ατμοστρόβιλοι συμπυκνώσεως** όπου η έξοδος του ατμοστροβίλου γίνεται στο συμπυκνωτή όπου έχουμε χαμηλές πιέσεις (0,06-0,02bar). Επίσης στην έξοδο του ατμοστροβίλου εμφανίζεται μερική υγροποίηση του ατμού. Συνήθως μέγιστο όριο υγροποίησης είναι η ξηρότητα να είναι  $x=85\%$ . Αυτοί οι στρόβιλοι συνήθως χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής. Χρησιμοποιούνται σε όλους τους λιθανθρακικούς, πυρηνικούς και συνδυασμένου κύκλου σταθμούς. Η συμπυκνούμενη υγρασία που εμφανίζεται στις τελευταίες βαθμίδες απαιτεί ιδιαίτερη κατασκευή των πτερυγίων με υψηλή αντοχή.
- **Ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης** όπου ο ατμός στην έξοδο έχει μεγάλη πίεση, δηλαδή 1- 6bar. Αυτοί οι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν καταναλώσεις ατμού σε μεγάλη πίεση και θερμοκρασία ή ακόμα και ένας άλλος στρόβιλος χαμηλότερης πίεσης. Η πίεση εξόδου του στρόβιλου καθορίζεται από μια ρυθμιστική βαλβίδα που ρυθμίζει την πίεση ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτές είναι συχνές στα διυλιστήρια, στις χαρτοβιομηχανίες, στις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης.
- **Ατμοστρόβιλοι με αναθέρμανση** που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στην παραγωγή ενέργειας. Στη διάταξη με αναθέρμανση ο ατμός εξέρχεται από το τμήμα υψηλής πίεσης του στρόβιλου και επιστρέφει στον ατμοποιητή όπου υπερθερμαίνεται περαιτέρω. Μετά ο ατμός εισέρχεται στη μέση πίεση και συνεχίζει την εκτόνωση. Οι ατμοστρόβιλοι αυτού του τύπου θεωρούνται και ατμοστρόβιλοι συμπύκνωσης.
- **Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις** για εξωτερική τροφοδοσία, όπου μέρος του ατμού απομαστεύεται σε κατάλληλο μέρος του ατμοστροβίλου, ώστε να έχει την επιθυμητή πίεση, για την επιτέλεση κάποιας άλλης διεργασίας. Έτσι δεν εκτονώνεται όλη η ποσότητα του ατμού στο στρόβιλο. Σε έναν θερμικό σταθμό οι απομαστεύσεις μπορεί να εξυπηρετούν π.χ. την προθέρμανση του νερού. Οι απομαστεύσεις μπορεί να υπόκεινται σε έλεγχο πίεσης με στραγγαλιστική βαλβίδα ή να μην ελέγχονται. Ωστόσο πάντα υπάρχει μια βαλβίδα μιας κατεύθυνσης σε κάθε έξοδο

απομάστευσης. Επίσης υπάρχει βαλβίδα ασφαλείας που ελέγχει την πίεση στις απομαστεύσεις σε περίπτωση θέσης εκτός λειτουργίας.

### Χαρακτηριστικά ατμοστροβίλων

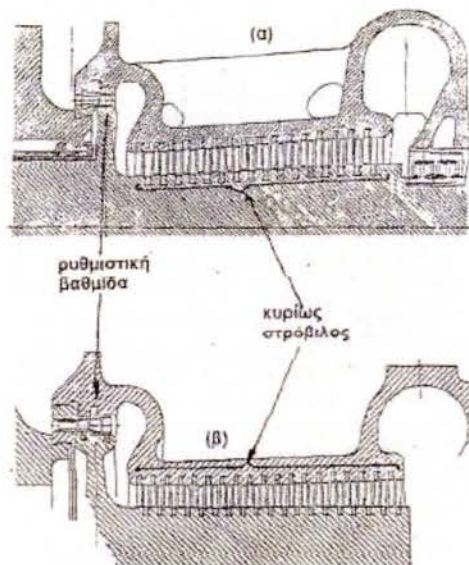
Οι περισσότεροι ατμοστροβίλοι που συναντώνται στην πράξη, ιδιαίτερα οι μεγάλης ισχύος, έχουν μεγάλο αριθμό βαθμίδων. Αυτό συμβαίνει γιατί ο στροβίλος πρέπει να λειτουργήσει σε θλιπτικά φορτία που συνεπάγονται μεγάλους λόγους πίεσης. Έτσι σε έναν ατμοστροβίλο ένας λόγος πίεσης της τάξης του 2000 δεν είναι ασυνήθιστος ενώ μπορεί να συναντήσει κανείς τιμές ως και 4000. Αυτή είναι μια μεγάλη διαφορά μεταξύ ατμοστροβίλων και αεριοστροβίλων. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον τρόπο δημιουργίας της πίεσης. Στον αεριοστροβίλο η υψηλή πίεση δημιουργείται από έναν αεροσυμπιεστή που είναι πολυβάθμιος και υπόκειται σε περιορισμούς λειτουργίας, λόγω της συμπεστότητας του ρευστού. Ακόμα η εκτόνωση γίνεται πάντα σε συνθήκες κοντά στις ατμοσφαιρικές. Αντίθετα σε έναν κύκλο ατμού η αύξηση της πίεσης δημιουργείται από αντλίες που διαχειρίζονται ασυμπιεστο ρευστό και έχουν την δυνατότητα πολύ μεγαλύτερης αύξησης της πίεσης με πολύ λιγότερη ισχύ από τους αεροσυμπιεστές. Ακόμα η πίεση εκτόνωσης στους ατμοστροβίλους καθορίζεται από την πίεση του ψυγείου που αυτή με την σειρά της καθορίζεται από την θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται, ενώ το όλο κύκλωμα είναι απομονωμένο από το περιβάλλον. Οι τεράστιες μεταβολές πίεσης που καλούνται να αποτονώσουν οι ατμοστροβίλοι οδηγούν σε έναν μεγάλο αριθμό βαθμίδων και σε έναν ιδιαίτερο σχεδιασμό που δεν συναντάται σε αεριοστροβίλους.

Η μεγάλη διαφορά πίεσης εισόδου και εξόδου συνεπάγεται μεγάλες αξονικές δυνάμεις. Οι αξονικές δυνάμεις αυτές δεν είναι τόσο έντονες στους στροβίλους δράσης, όπου η μεταβολή της αξονικής ορμής είναι μικρή, όσο στους στροβίλους αντίδρασης, όπου υπάρχει μεγάλη μεταβολή της στατικής πίεσης σε κάθε πτερύγωση. Σε μικρές εγκαταστάσεις το πρόβλημα λύνεται με έμβολα εξισορρόπησης. Ωστόσο σε μεγάλες εγκαταστάσεις η λύση που ακολουθείται είναι η διαίρεση της ροής σε αντίρροπα ρεύματα που διοχετεύονται σε διάταξη αντιρροής. Έχοντας ταυτόσημους στροβίλους οι αντίθετες φορές διέλευσης του ατμού προκαλούν ίσες και αντίθετες αξονικές δυνάμεις. Άλλη λύση είναι η τοποθέτηση ενός τμήματος του στροβίλου (π.χ. μέσης πίεσης) με αντίθετη κατεύθυνση ροής. Με κατάλληλο σχεδιασμό των υπόλοιπων τμημάτων είναι δυνατό πάλι να εξλειφθεί η αξονική δύναμη.

Ακόμα είναι δυνατό με την διαίρεση της ροής να μειωθεί το ύψος της διατομής από όπου διέρχεται ο ατμός με αποτέλεσμα να μειωθεί το ύψος των πτερυγίων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα στις τελευταίες βαθμίδες χαμηλής πίεσης όπου η πυκνότητα έχει μειωθεί πολύ και ο διακινούμενος όγκος είναι πολύ μεγάλος και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλες διατομές και μεγάλα ύψη πτερυγίων που παρουσιάζουν προβλήματα αντοχής. Σύνηθες είναι σε ατμοστροβίλους να χρησιμοποιούνται βαθμίδες μερικής προσβολής που περιλαμβάνουν σταθερά πτερύγια, τα οποία δεν καταλαμβάνουν ολόκληρη την περιφέρεια αλλά μόνο ορισμένους τομείς της. Αυτό γίνεται για δυο λόγους:

- 1) Αν η παροχή, πίεση και θερμοκρασία του ατμού είναι τέτοιες που να οδηγήσουν σε πολύ μικρά ύψη πτερυγίων, είναι πιθανό να είναι επωφελέστερη η χρήση βαθμίδας μερικής προσβολής. Αυτό συμβαίνει επειδή στα πτερύγια με πολύ μικρό ύψος είναι έντονα τα οριακά στρώματα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες απώλειες λόγω στροβιλισμών. Με την χρήση μερικών τομέων της περιφέρειας αυξάνεται το ύψος των πτερυγίων σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση όπου χρησιμοποιείτο όλη η περιφέρεια, δεδομένου ότι απαιτείται ίδιο εμβαδό διατομής εισόδου.
- 2) Η μερική προσβολή μπορεί να προσφέρει καλύτερο τρόπο ελέγχου της ισχύος εξόδου του ατμοστροβίλου όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Είναι ευκολότερος και αποδοτικότερος ο έλεγχος της ισχύος εξόδου του στροβίλου με μείωση της παροχής ( με ελάττωση του ενεργού εμβαδού ροής) από ότι με μείωση της πίεσης εισόδου (στραγγαλισμός). Η μερική προσβολή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε ισόθλιπτους (δράσης) στροβίλους, καθώς η στατική πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά στην κινητή πτερύγωση. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή σε υπέρθλιπτους, η μεταβολή της πίεσης θα οδηγούσε στην εμφάνιση σημαντικών απωλειών διαφυγών προς την μη προσβαλλόμενη περιοχή.





*Σχήμα 3.13: Θέση ρυθμιστικής βαθμίδας σε σχέση με τον υπόλοιπο ατμοστρόβιλο*

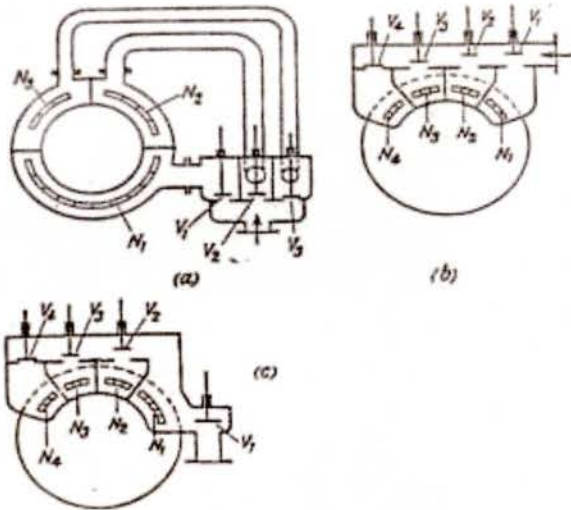
### Τρόποι ρύθμισης ατμοστροβίλων

Εννοούμε τους τρόπους με τους οποίους μεταβάλλουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ατμοστροβίλου ώστε να ταιριάζουν με την μηχανή την οποία κινεί. Οι κύριοι τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

1) Με στραγγαλισμό που πραγματοποιείται από ρυθμιστική βάνα πριν την είσοδο του ατμού στον ατμοστρόβιλο. Η μεταβολή κατά τον στραγγαλισμό είναι ισενθαλπική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση για την ίδια πίεση εξόδου να μειωθεί. Εκτός αυτού η πτώση πίεσης στην είσοδο του στροβίλου έχει ως αποτέλεσμα μείωση της παροχής του.

2) Με έλεγχο των ακροφυσίων εισόδου. Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης του φορτίου είναι με ρύθμιση της ποσότητας του ατμού που παρέχεται στον ατμοστρόβιλο, ρυθμίζοντας το εμβαδό των ακροφυσίων εισόδου. Ιδανική περίπτωση θα ήταν η ομοιόμορφη μεταβολή του εμβαδού στο λαιμό όλων των ακροφυσίων, πράγμα αδύνατο. Η λύση είναι ο χωρισμός των ακροφυσίων εισόδου σε ομάδες και η διοχέτευση της παροχής σε ομάδες ακροφυσίων. Για δεδομένες συνθήκες εισόδου και στραγγαλισμένα ακροφύσια εισόδου η παροχή του ατμού είναι ευθέως ανάλογη με τον αριθμό των εν λειτουργία ακροφυσίων. Αυτή η ρύθμιση επηρεάζει μόνο την ρυθμιστική βαθμίδα του ατμοστροβίλου ενώ οι βαθμίδες που ακολουθούν έχουν σταθερή γεωμετρία. Η μεταβολή του αριθμού των ανοικτών ακροφυσίων και της παροχής ατμού από την ρυθμιστική βαθμίδα καθορίζει την πίεση εξόδου από αυτήν.

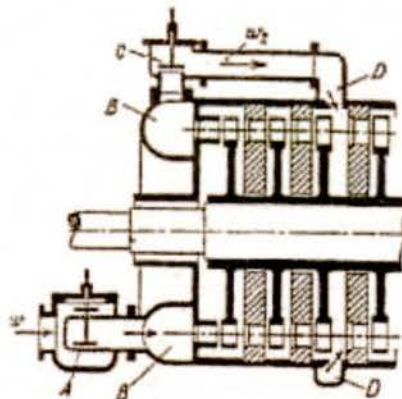
Ουσιαστικά αυτή η μέθοδος ρύθμισης μοιάζει με την προηγούμενη περίπτωση (ρύθμιση με στραγγαλισμό), μόνο που αντί ο στραγγαλισμός να γίνει σε όλη την παροχή του ατμού γίνεται σε κάθε τομέα ξεχωριστά από διαφορετική βαλβίδα και έτσι γίνεται ρύθμιση της παροχής διαμέσου της κάθε ομάδας ακροφυσίων (και κατ' επέκταση της πίεσης). Το πλεονέκτημα σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι ο στραγγαλισμός δεν γίνεται σε όλη την ροή με αποτέλεσμα να «καταστρέφεται» μικρότερο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας του ατμού.



Σχήμα 3.14: Ομάδες ακροφυσίων για ρύθμιση παροχής

3) Με παράκαμψη. Ρύθμιση αυτού του είδους επιτρέπει την λειτουργία του ατμοστρόβιλου με φορτία μεγαλύτερα του ονομαστικού. Αυτό που γίνεται είναι διοχέτευση ατμού αρχικών ολικών συνθηκών σε κάποιες πίσω βαθμίδες, παρακάμπτοντας τις πρώτες. Με αυτόν τον τρόπο διοχετεύεται μεγαλύτερη ποσότητα ατμού στις πίσω βαθμίδες με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερη ισχύς από την ονομαστική. Ο λόγος που εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος είναι γιατί με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο στραγγαλισμός μέρους της ποσότητας ατμού. Έτσι αποφεύγονται οι απώλειες λόγω στραγγαλισμού που δημιουργούνται από την στραγγαλιστική βαλβίδα και δεν υπάρχουν απώλειες μερικής προσβολής καθώς δεν υπάρχουν ακροφύσια.

Η ρύθμιση με παράκαμψη συνδυάζεται με κατάλληλη βαλβίδα ελέγχου, που ρυθμίζει την λειτουργία και ενεργοποιείται από κάποιο φορτίο και μετά. Η πίεση του παραγόμενου ατμού από τον ατμοπαραγωγό συνήθως είναι σταθερή (λειτουργία σταθερής πίεσης), μπορεί όμως και να μεταβάλλεται μέσω μεταβολής των στροφών των τροφοδοτικών αντλιών (ολισθαίνουσα πίεση). Άλλοι τρόποι ρύθμισης είναι με τον περιορισμό των απομαστεύσεων. Έτσι με το κλείσιμο μιας απομάστευσης προς έναν προθερμαντήρα μπορεί να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς αλλά να μειωθεί ο βαθμός απόδοσης.



Σχήμα 3.15: Ρύθμιση με παράκαμψη

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ”

#### 4.1 Εισαγωγή στο συνδυασμένο κύκλο λειτουργίας

Η συνεχής αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας και οι απαιτήσεις για μείωση των ρύπων οδηγούν σε προσπάθεια αύξησης του βαθμού απόδοσης που έχει σαν επακόλουθη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, την επέκταση του χρονικού ορίου επάρκειας αυτών. Η αύξηση της απόδοσης γίνεται με αύξηση των επιπέδων των θερμοκρασιών και πιέσεων του θερμικού κύκλου. Αυτό είναι πολυδάπανο για τους κλασικούς θερμικούς σταθμούς, εφικτό όμως όσον αφορά την αύξηση του βαθμού απόδοσης στους συνδυασμένους κύκλους αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων. Ο συνδυασμός αεριοστροβίλων με ατμοστροβίλους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον ειδικά τα τελευταία χρόνια γιατί παρ' όλο που δίνει ένα πολυπλοκότερο σύστημα σε σχέση με τους κλασικούς ΑΗΣ, έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης με μικρότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Γενικά, όταν δυο κύκλοι συνδυάζονται σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας τότε η απόδοση του συνολικού κύκλου είναι μεγαλύτερη από αυτήν που θα μπορούσε να επιτευχθεί από τους δύο κύκλους ξεχωριστά. Οι θερμικοί κύκλοι μπορούν να χρησιμοποιούν το ίδιο ή διαφορετικό εργαζόμενο μέσο. Ωστόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν κύκλοι με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα καθώς τα πλεονεκτήματά τους μπορούν να συνδυαστούν. Όταν λοιπόν δυο κύκλοι συνδυάζονται, ο ένας λειτουργεί σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα από τον άλλο. Ο κύκλος που λειτουργεί σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες ονομάζεται ανώτερος κύκλος (topping cycle). Η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται αξιοποιείται περαιτέρω από τον κύκλο όπου γίνεται η δεύτερη διεργασία. Αυτός ο κύκλος λειτουργεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία και γι' αυτό ονομάζεται κατώτερος κύκλος (bottoming cycle).

Η προσεκτική επιλογή των εργαζόμενων μέσων σημαίνει μια συνολική διεργασία που μπορεί να κάνει ιδανική θερμοδυναμική χρήση της θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία, ενώ απορρίπτει θερμότητα στην χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία. Συνήθως ο ανώτερος και κατώτερος κύκλος είναι συνδεδεμένοι με έναν εναλλάκτη θερμότητας.

Ο συνδυασμός ο οποίος χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτός όπου ο ανώτερος κύκλος είναι με αέρα ενώ ο κατώτερος με νερό και ατμό. Η αντικατάσταση του νερού – ατμού στον κατώτερο κύκλο με οργανικά ή με αμμωνία έχει προταθεί λόγω της δυνατότητας που προσφέρεται για ακόμα μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας της απορριπτόμενης θερμότητας.

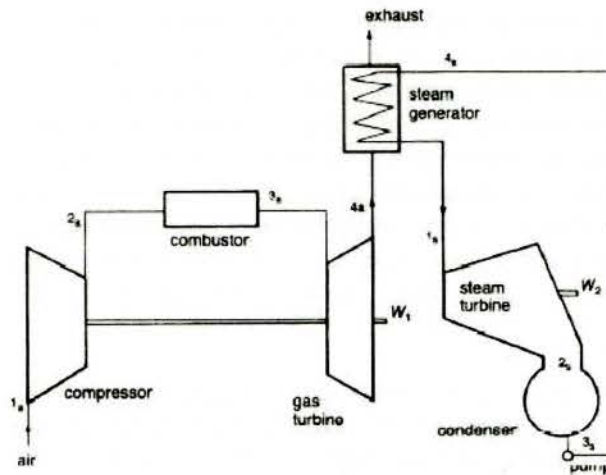
Ωστόσο καθώς οι μέγιστες θερμοκρασίες των αεριοστροβίλων αυξάνονται με την πρόοδο της τεχνολογίας, ομοίως αυξάνεται και η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Αυτό έχει ως συνέπεια τα πλεονεκτήματα των άλλων υλικών έναντι του νερού να μην είναι τόσο σημαντικά, δεδομένου του υψηλότερου κόστους κατασκευής και του πιθανού κινδύνου που παρουσιάζεται π.χ. σε περιπτώσεις διαφυγής της αμμωνίας στο περιβάλλον. Αυτοί οι εναλλακτικοί κύκλοι δεν φαίνεται να αντικαταστήσουν τον συνδυασμένο κύκλο με αέρα και νερό-ατμό στο εγγύς μέλλον. Στην συνέχεια όποτε γίνεται αναφορά για συνδυασμένο κύκλο θα εννοείται ότι μιλάμε για τον κύκλο με αέρα και νερό-ατμό.

#### 4.1.1.1 Πλεονέκτημα του συνδυασμένου κύκλου

Τα πλεονεκτήματα του συνδυασμένου κύκλου είναι:

- Τα πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων που ήδη έχουν αναφερθεί
- Ο αέρας αποτελεί ένα απλό μέσο που χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες στροβιλομηχανές σε μεγάλες θερμοκρασίες εισόδου του αέρα στον στρόβιλο, δίνοντας καλύτερες προϋποθέσεις για έναν καλό ανώτερο κύκλο
- Το νερό/ατμός είναι ένα φθινό μέσο, το οποίο βρίσκεται άφθονο στην φύση, δεν εγκυμονεί κινδύνους και είναι κατάλληλο για τις μέτριες και χαμηλές θερμοκρασίες του κύκλου αποτελώντας το μέσο για τον κατώτερο κύκλο. Η εξέλιξη αυτού του είδους κύκλων έγινε δυνατή με την εξέλιξη του αεριοστρόβιλου.

Αυτή η εξέλιξη είναι πρόσφατο γεγονός, περί το 1970 άρχισαν να κατασκευάζονται αεριοστρόβιλοι με θερμοκρασίες εισόδου στον στρόβιλο και συνεπώς θερμοκρασίες εξόδου από αυτόν αρκετά υψηλές ούτως ώστε να είναι δυνατή η σχεδίαση συνδυασμένων κύκλων υψηλής απόδοσης. Η εξέλιξη διευκολύνθηκε καθώς η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε είχε ήδη αποδεδειγμένη αξία: σε μονάδες παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούνταν αεριοστρόβιλοι αλλά και ατμοπαραγωγοί με ατμοστρόβιλους. Αυτό βοήθησε στο να μείνει το κόστος της επένδυσης αλλά και της περαιτέρω ανάπτυξης αρκετά χαμηλό. Το αποτέλεσμα είναι ένας κύκλος με αρκετά μεγάλη απόδοση, μικρό κόστος επένδυσης και μικρό χρόνο παράδοσης.



Σχήμα 4.1: Μονογραμμικό σχέδιο συνδυασμένου κύκλου

#### 4.1.2 Γενικά στοιχεία του συνδυασμένου κύκλου

Ο συνδυασμένος κύκλος, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελείται από τον συνδυασμό των κύκλων του Joule – Brayton (σαν ανώτερος κύκλος) και του Rankine (κατώτερος κύκλος). Ο αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται είναι ένας κλασικός αεριοστρόβιλος όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Μπορεί να είναι βιομηχανικός ή παράγωγος αεροπορικού, αλλά αυτό δεν έχει τόσο σημασία. Στην απλή περίπτωση του συνδυασμένου κύκλου ο αεριοστρόβιλος αναρροφά αέρα, τον συμπιέζει μέχρι μια ανώτερη πίεση, μετά εκτελεί την καύση ανεβάζοντας την θερμοκρασία στην ανώτερη του κύκλου και εκτονώνει το καυσαέριο στον στρόβιλο. Τα θερμά καυσαέρια που παράγονται εισέρχονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator –HRSG) και παράγεται ατμός. Ο ατμός στην συνέχεια διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο για την επιπρόσθετη παραγωγή ενέργειας. Στην συνέχεια ο εκτονωμένος ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή και τέλος συμπιέζεται από τις αντλίες για την ανατροφοδότηση του κύκλου.

Προφανώς ο κύκλος που αναφέρθηκε είναι ο απλούστερος δυνατός αλλά σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται έτσι. Πρώτα απ' όλα, αντί ενός απλού αεριοστρόβιλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάποιες παραλλαγές του (διπλής ατράκτου, με αναθέρμανση των καυσαερίων κλπ). Ακόμα σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται μόνο μια πίεση· συνήθως χρησιμοποιούνται δυο ή και τρεις πιέσεις ενώ είναι πιθανές παραλλαγές του κύκλου Rankine όπως π.χ. με αναθέρμανση ή προθέρμανση τροφοδοτικού νερού, που ήδη αναλύθηκαν.

Ακόμα μια βασική διαφορά μεταξύ κλασικών ατμοηλεκτρικών σταθμών και σταθμών συνδυασμένου κύκλου είναι η κατασκευή του ατμοπαραγωγού/λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Τα υπόλοιπα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται (ατμοστρόβιλοι, τροφοδοτικές αντλίες, συμπυκνωτές κλπ.) είναι παρόμοια και έχει ήδη αναλυθεί η σημασία τους.

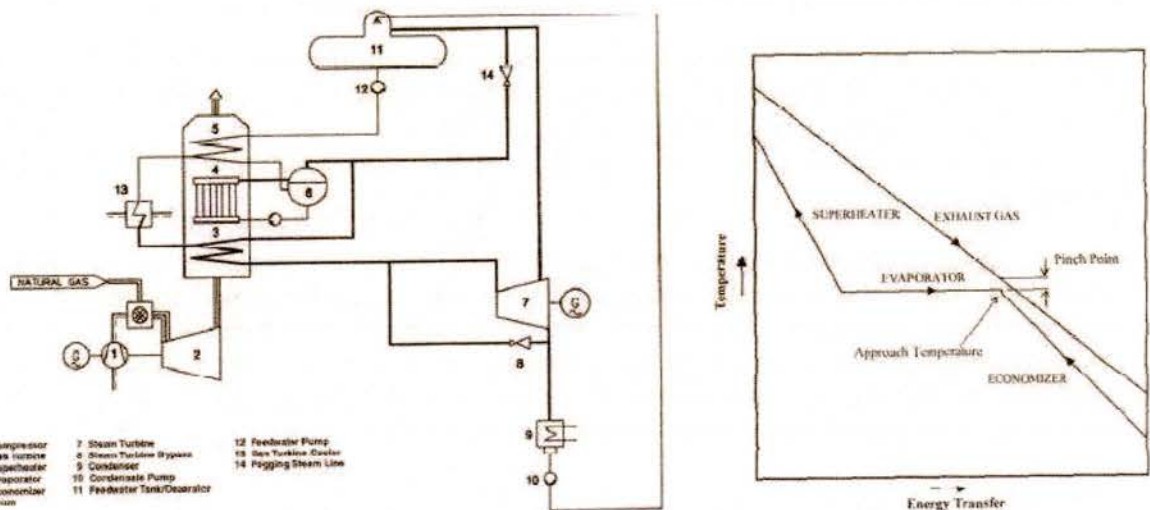
## 4.2 Είδη του συνδυασμένου κύκλου

Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι συνδυασμένοι κύκλοι, ξεκινώντας από τον πιο απλό κύκλο και καταλήγοντας στους πιο πολύπλοκους, θεωρώντας απλό το κύκλο αεριοστρόβιλου.

### Κύκλος μιας πίεσης

Ο απλούστερος κύκλος είναι ο βασικός κύκλος μιας πίεσης καθώς ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HRSG) παράγει ατμό μιας πίεσης για τον ατμοστρόβιλο. Ο ατμοστρόβιλος διαθέτει παράκαμψη ατμού που στέλνει τον ατμό στον συμπυκνωτή σε περίπτωση που δεν είναι δυνατό ο ατμός να διέλθει από τον ατμοστρόβιλο. Μετά τον συμπυκνωτή το συμπυκνωμένο νερό οδηγείται με αντλίες στον απαεριωτή και μετά στον λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Για την θέρμανση του απαεριωτή χρησιμοποιείται ατμός που απομαστεύεται από τον ατμοστρόβιλο. Ο λέβητας ανάκτησης χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα: τον οικονομητήρα, τον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντή. Το τροφοδοτικό νερό θερμαίνεται σε θερμοκρασία κοντά στον κορεσμό από τον απαεριωτή και τον οικονομητήρα και μετά οδηγείται στον ατμοποιητή όπου και ατμοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία.

Ο ατμός και το νερό επανέρχονται στο τύμπανο απ' όπου ο ατμός συνεχίζει προς τον υπερθερμαντή για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία. Μέρος της παροχής του υπερθερμαντή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βοηθητικές καταναλώσεις.



**Σχήμα 4.2:** Συνδυασμένος κύκλος μίας πίεσης (αριστερά) και διάγραμμα θερμοκρασίας νερού/ατμού-καυσαερίων (δεξιά)

Ωστόσο αυτός ο κύκλος δεν κάνει τόσο καλή αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Ακόμα ισχύουν:

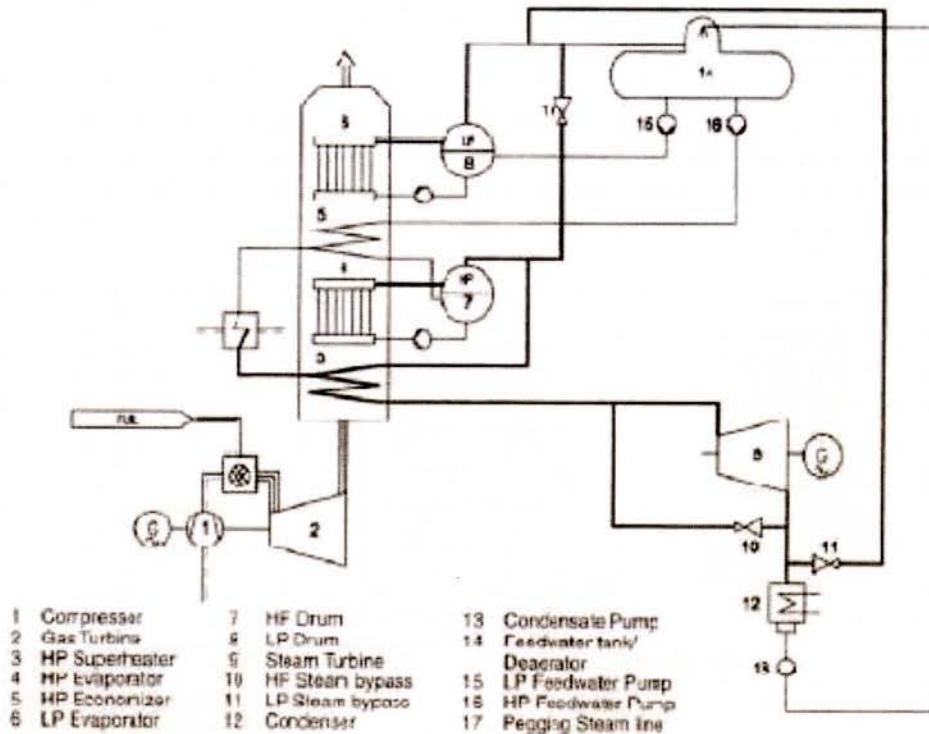
- Η αύξηση της πίεσης στον κύκλο δεν σημαίνει αναγκαία καλή απόδοση γιατί παρ' όλο που σε μεγάλη πίεση αυξάνεται η ενθαλπική πτώση στον αμοστρόβιλο, αυξάνεται και η θερμοκρασία ατμοποίησης και παράγεται λιγότερος ατμός. Κατά συνέπεια αυξάνεται η απορριπτόμενη θερμότητα μέσω των καυσαερίων και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Ακόμα μεγάλη πίεση του κύκλου συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού υγρασίας στην έξοδο του στροβίλου που έχει σαν αποτέλεσμα μείωση του βαθμού απόδοσης του αμοστρόβιλου.
- Ωστόσο, δεδομένου ότι η πίεση επιδρά στην ποσότητα του παραγόμενου ατμού, η χαμηλή πίεση θα οδηγήσει στην απόρριψη περισσότερης ενέργειας στο συμπυκνωτή, γιατί η ποσότητα του ατμού θα είναι περισσότερη.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ενέργειας του κύκλου. Αυτό συμβαίνει γιατί αυξάνοντας την θερμοκρασία αυξάνεται μεν η ενθαλπική πτώση στον αμοστρόβιλο, αλλά μειώνεται η ποσότητα ατμού λόγω της υπερθέρμανσης σε μεγαλύτερη θερμοκρασία. Το κυριότερο φαινόμενο από τα προαναφερθέντα είναι το δεύτερο με αποτέλεσμα την μείωση της παραγόμενης ισχύος.
- Η χρήση προθέρμανσης του τροφοδοτικού νερού με την χρήση απομάστευσης ατμού από τον αμοστρόβιλο δεν θα οδηγούσε σε βελτίωση της απόδοσης του κύκλου καθώς θα οδηγούσε σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων. Όσο μεγαλύτερες θερμοκρασίες τροφοδοτικού νερού επιτυγχάνονται τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Αυτή είναι μια σημαντική διαφορά μεταξύ συμβατικών ΑΗΣ και των σταθμών συνδυασμένου κύκλου.

Στους κλασσικούς αμοπαγωγούς υπάρχει αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας που αξιοποιεί την θερμότητα των καυσαερίων μετά την έξοδο από τον οικονομητήρα σε αντίθεση με τους συνδυασμένους κύκλους όπου τα καυσαέρια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα μετά τον οικονομητήρα. Ακόμα η χαμηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ νερού και εξόδου καυσαερίων στον συνδυασμένο κύκλο παρουσιάζεται στο θερμό άκρο του εναλλάκτη σε αντίθεση με τους κλασσικούς αμοηλεκτρικούς σταθμούς, όπου παρουσιάζεται στο ψυχρότερο άκρο.

### **Συνδυασμένος κύκλος μιας πίεσης με προθερμαντικό βρόχο**

Έτσι στον συνδυασμένο κύκλο η αμοπαγωγή δεν εξαρτάται από την προθέρμανση, αντίθετα από τους κλασσικούς αμοηλεκτρικούς σταθμούς. Κατά συνέπεια, το επόμενο βήμα είναι η χρήση ενός προθερμαντικού βρόχου χαμηλότερης πίεσης. Ο απαερωτής σε αυτήν την περίπτωση δεν θα χρησιμοποιεί απομάστευση ατμού από τον αμοστρόβιλο, αλλά κορεσμένο ατμό της χαμηλότερης πίεσης.

Στην συνέχεια το τροφοδοτικό νερό του απαερωτή θα οδηγείται στον προθερμαντικό βρόχο χαμηλής πίεσης και στο κύκλωμα υψηλής πίεσης. Σε αυτήν την περίπτωση ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται καθώς γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα προθέρμανσης με την χρήση προθερμαντήρα ατμού. Ο προθερμαντήρας ατμού μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της αμοπαγωγής χωρίς να έχει τόσο αρνητική επίδραση στον βαθμό απόδοσης, λόγω του προθερμαντικού βρόχου χαμηλής πίεσης.



Σχήμα 4.3: Συνδυασμένος κύκλος μιας πίεσης με προθερμαντικό βρόχο

Επομένως ο κύκλος αυτός γίνεται ιδανικός για την χρήση καυσίμων με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, καθώς τα καυσαέρια θα απελευθερώνονταν σε αρκετά μεγάλη θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτήν του όξινου σημείου δρόσου για να αποφευχθεί συμπύκνωση θεικού οξέως. Ωστόσο θα υπήρχε περαιτέρω δυνατότητα αύξησης αν ο ατμός χαμηλής πίεσης διοχετευόταν σε κατάλληλη βαθμίδα του ατμοστρόβιλου.

### Συνδυασμένος κύκλος δυο πιέσεων

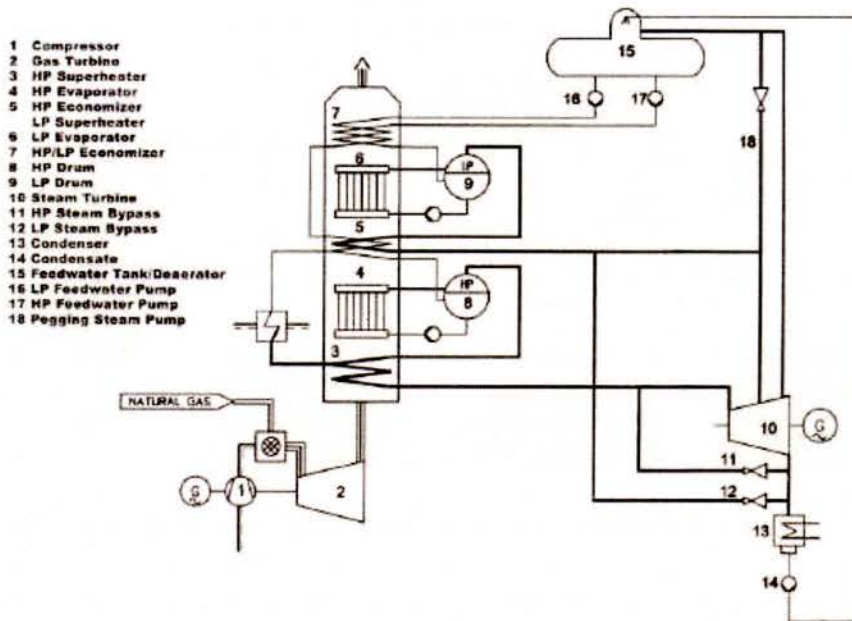
Έτσι το επόμενο βήμα είναι η χρήση διπλής πίεσης, μιας χαμηλής και μιας υψηλής. Ο βρόχος χαμηλής πίεσης δημιουργεί ατμό για τον ατμοστρόβιλο και για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Το τροφοδοτικό νερό στην συνέχεια οδηγείται με αντλίες στα κυκλώματα χαμηλής και υψηλής πίεσης και στην συνέχεια η υψηλή πίεση εκτονώνεται στον στρόβιλο. Σε κάποια βαθμίδα του στρόβιλου εισέρχεται και ο ατμός χαμηλής πίεσης. Το όλο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καύσιμα με θείο με την προσθήκη προθερμαντών του τροφοδοτικού νερού με ατμό.

Σε αυτήν την περίπτωση κάθε προθερμαντής οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ισχύος λόγω αύξησης της ατμοπαραγωγής, ενώ συμφέρει τοποθέτηση προθερμαντών που απομαστεύουν ατμό σε διαφορετικές πιέσεις (σταδιακή προθέρμανση) ούτως ώστε μεγαλύτερο τμήμα του ατμού να μπορεί να εκτονωθεί στον ατμοστρόβιλο. Εναλλακτικά σε περίπτωση χρήσης καυσίμων με μικρή περιεκτικότητα σε θείο μπορεί να αποφευχθεί η χρήση προθερμαντών με ατμό, για την περαιτέρω αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Η προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού στον απαερωτή μπορεί να γίνει με απομάστευση από τον στρόβιλο.

Σε τέτοιου είδους κύκλους η υψηλή πίεση είναι επιθυμητό να είναι σε υψηλά επίπεδα, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί μεγάλη δυνατότητα απόδοσης έργου στον ατμοστρόβιλο. Αντίθετα η χαμηλή πίεση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να γίνεται καλή αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων. Ωστόσο, η

υψηλή πίεση δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποια όρια λόγω αύξησης της υγρότητας του ατμού στην έξοδο του στροβίλου. Αυτό βέβαια εξετάζεται σε συνάρτηση με την χαμηλή πίεση. Όσο χαμηλότερη είναι η χαμηλή πίεση, τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης. Όμως, επειδή η πίεση μειώνεται, αυξάνεται ο ειδικός όγκος με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλες διατομές για τους σωλήνες, μηχανές κ.λπ. που σημαίνει ακριβές μηχανές.

Αντίθετα με τον κύκλο μονής πίεσης η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε άμεση αύξηση της παραγόμενης ισχύος, καθώς δίνεται περισσότερη ισχύς στην χαμηλή πίεση, πράγμα που αποζημιώνει την μείωση του έργου από την υψηλή πίεση (που οφείλεται σε μείωση της ατμοπαραγωγής)



Σχήμα 4.4: Συνδυασμένος κύκλος δυο πιέσεων

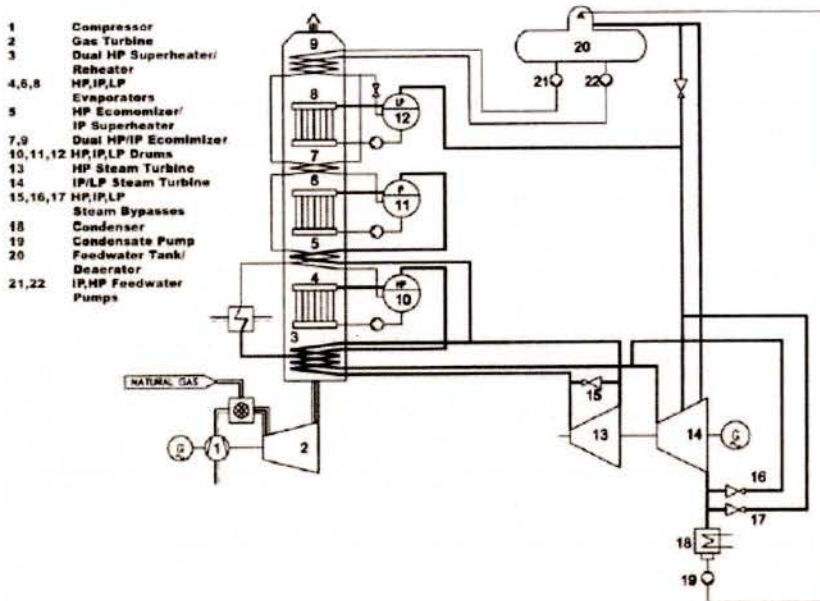
### Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων

Εάν προστεθεί ακόμα μια βαθμίδα πίεσης στο κύκλωμα διπλής πίεσης, θα είναι δυνατή μεγαλύτερη ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων. Έτσι δημιουργήθηκε ο κύκλος των τριών πιέσεων. Σε αυτήν την περίπτωση από τον απαερωτή υπάρχουν οι τρεις τροφοδοσίες μία για κάθε πίεση. Σε κάθε πίεση υπάρχει προθερμαντής, ατμοποιητής και υπερθερμαντής. Η κάθε πίεση εισέρχεται σε διαφορετική βαθμίδα του στροβίλου, ενώ η απαερίωση γίνεται με απομάστευση και/ή χρήση μέρους του ατμού χαμηλής πίεσης. Κύκλοι αυτού του είδους έχουν την δυνατότητα επίτευξης βαθμών απόδοσης της τάξης του 58%.

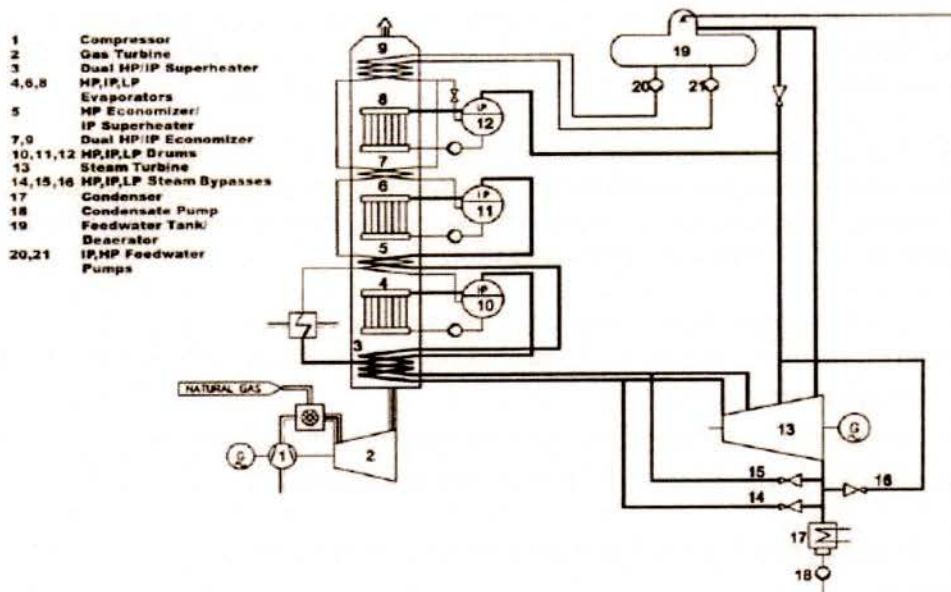
- Η υψηλή πίεση είναι περίπου 100bar, καθώς επιπλέον αύξησή της έχει ως συνέπεια μεγάλη αύξηση της υγρότητας στην έξοδο του ατμοστροβίλου, η μέση πίεση έχει βέλτιστη τιμή περίπου στα 25 bar, ενώ η χαμηλή δεν πρέπει να πέσει κάτω από τα 3bar καθώς αποδίδει λίγο έργο στον στροβίλο ενώ απαιτεί ακριβή κατασκευή, λόγω μεγάλων διατομών στους σωλήνες μεταφοράς και στον ατμοστροβίλο.
- Η θερμοκρασία της υψηλής πίεσης είναι που καθορίζει ουσιαστικά την παραγόμενη ισχύ. Η μέση πίεση θερμαίνεται συνήθως στα ίδια επίπεδα με την υψηλή πίεση και βοηθά στην μείωση της υγρότητας του ατμού καθώς οδηγεί την καμπύλη εκτόνωσης δεξιότερα στο διάγραμμα T-s, εκτός από την επιπρόσθετη παραγωγή έργου (δρα σαν αναθέρμανση). Ωστόσο το σημείο ανάμειξης



πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για να αποφευχθούν θερμικές καταπονήσεις. Χρήση προθερμαντών με απομάστευση ατμού δεν συνηθίζεται, καθώς η θερμοκρασία του ατμού είναι αρκετά κοντά στην θερμοκρασία των καυσαερίων. Ακόμα αύξηση της αποδιδόμενης ισχύος γίνεται με χρήση αναθέρμανσης. Σε αυτόν τον κύκλο η υψηλή πίεση είναι στα 120bar και αφού αποτονωθεί μερικώς στον αμοστρόβιλο αναθερμαίνεται και συνεχίζει την εκτόνωση. Λόγω της αναθέρμανσης, η εκτόνωση οδηγείται δεξιότερα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αυξημένη υγρασία στην έξοδο του αμοστρόβιλου



Σχήμα 4.5: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων



Σχήμα 4.6: Συνδυασμένος κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση

## 5 <sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### “ΜΟΝΑΔΑ 5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΣ 370MW”

#### 5.1.1 Γενικές Πληροφορίες

Το Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου αποτελεί ένα από τα κύρια κέντρα παραγωγής ηλεκτρισμού της ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ Α.Ε. - ΔΕΗ Α.Ε. Είναι εγκατεστημένο στο Νοτιοανατολικό άκρο της ηπειρωτικής Ελλάδας κοντά στην πόλη του Λαυρίου, 51 χιλιόμετρα μακριά από την Αθήνα. Η συνύπαρξή του με την τουριστική περιοχή του Σουνίου αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα κατά το σχεδιασμό του εργοστασίου που επέβαλε τη λήψη αυστηρών μέτρων περιβαλλοντικής προστασίας της περιοχής.

Το Ενεργειακό Κέντρο Ηλεκτροπαραγωγής είναι εγκατεστημένο σε γήπεδο έκτασης 404.997m<sup>2</sup> και αποτελείται από πέντε (5) αυτόνομα συγκροτήματα παραγωγής ρεύματος. Η σημερινή απασχόληση εργατικού δυναμικού ανέρχεται στα 300 άτομα και η λειτουργία του είναι σε 24ωρη βάση. Η κατασκευή του εργοστασίου άρχισε το 1969 και τέθηκε σε λειτουργία το 1972 ένα χρόνο αφού αποπερατώθηκε η κατασκευή της πρώτης και δεύτερης μονάδας παραγωγής. Ο αρχικός σχεδιασμός του Ενεργειακού Κέντρου περιελάμβανε πέντε (5) μονάδες καύσης βαρέως πετρελαίου. Αρχικά (1969-1971) κατασκευάστηκαν δυο μονάδες, η Μονάδα I και η Μονάδα II που προαναφέρθηκαν, ισχύος 150MW και 300MW αντίστοιχα, που είχαν σαν πρωτογενές καύσιμο το μαζούτ τύπου III. Αργότερα κατασκευάστηκαν τρεις ακόμη μονάδες που λειτούργησαν με πρώτη ύλη το φυσικό αέριο. Το 1996 ο οίκος BABCOCK Energy ανέλαβε την κατασκευή της Μονάδας παραγωγής III ισχύος 180 MW ενώ από τον οίκο ALSTOM μελετήθηκε και κατασκευάστηκε δυο χρόνια αργότερα η Μονάδα IV με ισχύ 560MW. Τέλος τον Απρίλιο του 2006 εισήλθε σε εμπορική λειτουργία και η νέα Μονάδα συνδυασμένου κύκλου (ΜονάδαV) ισχύος 385MW. Συνολικά, η ισχύς του εργοστασίου ανέρχεται σε περίπου 1600MW. Η γραμμή παραγωγής συνδέεται με το εθνικό δίκτυο μεταφοράς με γραμμές των 400kV και 150kV.

Η γενική διάταξη του εργοστασίου μελετήθηκε έτσι ώστε να καλύπτονται με αποτελεσματικό τρόπο οι λειτουργικές ανάγκες του σταθμού. Στο τοπογραφικό διάγραμμα που παρατίθεται, διακρίνονται τα μηχανοστάσια, οι λέβητες και ο λοιπός εξοπλισμός των Μονάδων, τα διάφορα κτίρια, καθώς και οι χώροι πρασίνου και σχετικά πληροφοριακά στοιχεία.

Τέλος κάποια πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του ΑΗΣ Λαυρίου είναι τα εξής:

- Βρίσκεται δίπλα στη θάλασσα: Οι λιμενικές εγκαταστάσεις επιτρέπουν την προσάραξη πλοίων για προμήθεια καυσίμων.
- Βρίσκεται κοντά σε περιοχές υψηλής κατανάλωσης (Αθήνα-Πειραιάς).
- Δεν προκαλεί αυξημένη ρύπανση σε κατοικημένη περιοχή.

#### 5.1.2 Ο ρόλος του Ε.Κ.Η Λαυρίου στο δίκτυο της ΔΕΗ

Ο ρόλος της ΔΕΗ ΑΕ εστιάζεται στην παραγωγή και διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας στην ελληνική αγορά. Για το σκοπό αυτό, η στρατηγική λειτουργίας της Εταιρίας στηρίζεται σε ένα σύστημα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα παραγωγής υλοποιείται από ένα δίκτυο ενεργειακών σταθμών διαφορετικής λειτουργίας (ανάλογα με τη τοποθεσία και το πρωτογενές καύσιμο), τμήμα του οποίου αποτελεί και η Μονάδα 5 του Λαυρίου.

Αναφορικά με το σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό στηρίζεται σε έναν μεγάλο αριθμό βρόγχων που λειτουργούν ως μέσα διοχέτευσης της παραγόμενης ενέργειας. Ρόλος λοιπόν όλων των σταθμών παραγωγής στο ευρύτερο δίκτυο της ΔΕΗ είναι η προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας στους βρόγχους με απώτερο στόχο τη διανομή της στο καταναλωτικό κοινό. Το Ε.Κ.Η Λαυρίου παρέχει ποσοστιαία το 10% της συνολικής ισχύος της ΔΕΗ που καλύπτει μέρος των αναγκών της Αττικής.

### 5.1.3 Παρουσίαση της Μονάδας 5

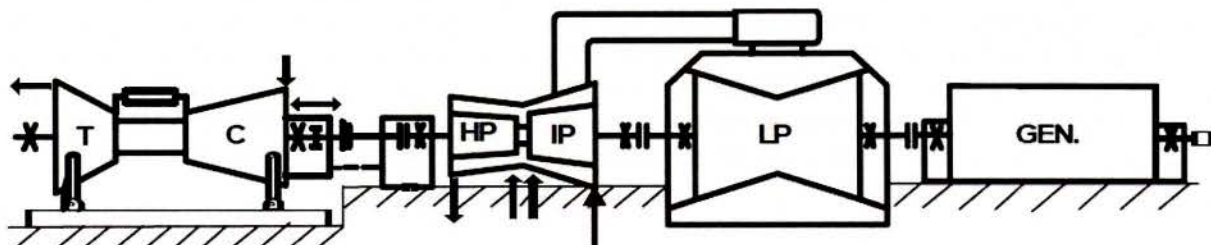
Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού αποφάσισε τον Οκτώβριο του 2002 να προχωρήσει στην υλοποίηση του έργου προμήθειας και εγκατάστασης μίας νέας μονάδας Συνδυασμένου Κύκλου, με καύσιμο φυσικό αέριο, ισχύος 360 – 400 MW, στο Λαύριο Αττικής, για να μειώσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον περιορισμό λειτουργίας παλαιών Μονάδων με υψηλότερο κόστος λειτουργίας, να βελτιώσει την αξιοπιστία του Συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Αττική, να καλύψει τις αυξανόμενες ανάγκες των πελατών της Επιχείρησης από το 2006 και μετά, να βελτιώσει τη θέση της Επιχείρησης σε ότι αφορά τη συμμόρφωση προς τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς που προκύπτουν κατώ από τις τελευταίες οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο διαγωνισμός για το έργο προκηρύχθηκε το Φεβρουάριο του 2003 με σαφή κριτήρια συμμετοχής. Οι προσφορές για το Διαγωνισμό υποβλήθηκαν στις 11-7-2003 και παρόλο που ο κάθε ενδιαφερόμενος θα μπορούσε να υποβάλει ένσταση κατά των όρων του Διαγωνισμού, δεν έγιναν στο διάστημα αυτό των 5 μηνών ενστάσεις επί των κριτηρίων συμμετοχής και των κριτηρίων αξιολόγησης. Όλες οι προβλεπόμενες διαδικασίες για την αξιολόγηση των προσφορών τηρήθηκαν υποδειγματικά και διήρκεσαν περίπου τέσσερις μήνες. Οι ανωτέρω επιλογές της Επιχείρησης απεδείχθησαν απολύτως επιτυχείς δεδομένου ότι τελικά στο Διαγωνισμό συμμετείχαν όλοι οι δραστηριοποιούμενοι στην Ελληνική αγορά μεγάλοι κατασκευαστές αεριοστρόβιλων (General Electric, Ansaldo με τεχνολογία Siemens, Alstom).

Η εννεαμελής Επιτροπή Αξιολόγησης, απαρτιζόμενη από στελέχη της Επιχείρησης, αλλά και εκπροσώπους του Τεχνικού Επιμελητηρίου, του Οικονομικού Επιμελητηρίου και της αντιπροσωπευτικής ομοσπονδίας ΓΕΝΟΠ/ΔΕΗ, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας τεχνικής και οικονομικής αξιολόγησης των προσφορών πρότεινε ομόφωνα την ανάθεση του Έργου στον πρώτο, τεχνικά αποδεκτό, μειοδότη εταιρεία ΜΕΤΚΑ Α.Ε. Με τη σύμφωνη Εισήγηση όλων των αρμοδίων Υπηρεσιών, το Δ.Σ. της Επιχείρησης στις 25.11.2003 ενέκρινε το αποτέλεσμα του Διαγωνισμού και αποφάσισε την κατακύρωση του Έργου στην μειοδότητρια εταιρεία ΜΕΤΚΑ Α.Ε., έναντι τιμήματος 193.962.846 €.

### 5.1.4 Περιγραφή της μονάδας

Η μονάδα 5 είναι ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου επί ενός άξονα. Δηλαδή ότι ο αεριοστρόβιλος – ατμοστρόβιλος – γεννήτρια τοποθετούνται σε κοινό άξονα. Η αεριοστρόβιλος χρησιμοποιεί σαν καύσιμο το φυσικό αέριο, ενώ τα καυσαέρια καταλήγουν στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας τριών πιέσεων με αναθέρμανση (υπάρχει αναλυτική επεξήγηση στις προηγούμενες σελίδες της μελέτης)



Σχήμα 5.1: Εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου επί ενός άξονα κύκλος τριών πιέσεων με αναθέρμανση

Το εργοστάσιο άρχισε να κατασκευάζεται στις αρχές του 2004 και η κατασκευή διήρκησε μόλις 2 έτη. Είναι ένα έργο «με το κλειδί στο χέρι» δηλαδή η μελέτη, προμήθεια, μεταφορά, κατασκευή και θέση σε λειτουργία γίνονται από τον έναν ανάδοχο, τη ΜΕΤΚΑ που ανήκει στον όμιλο Μυτιληναίου.



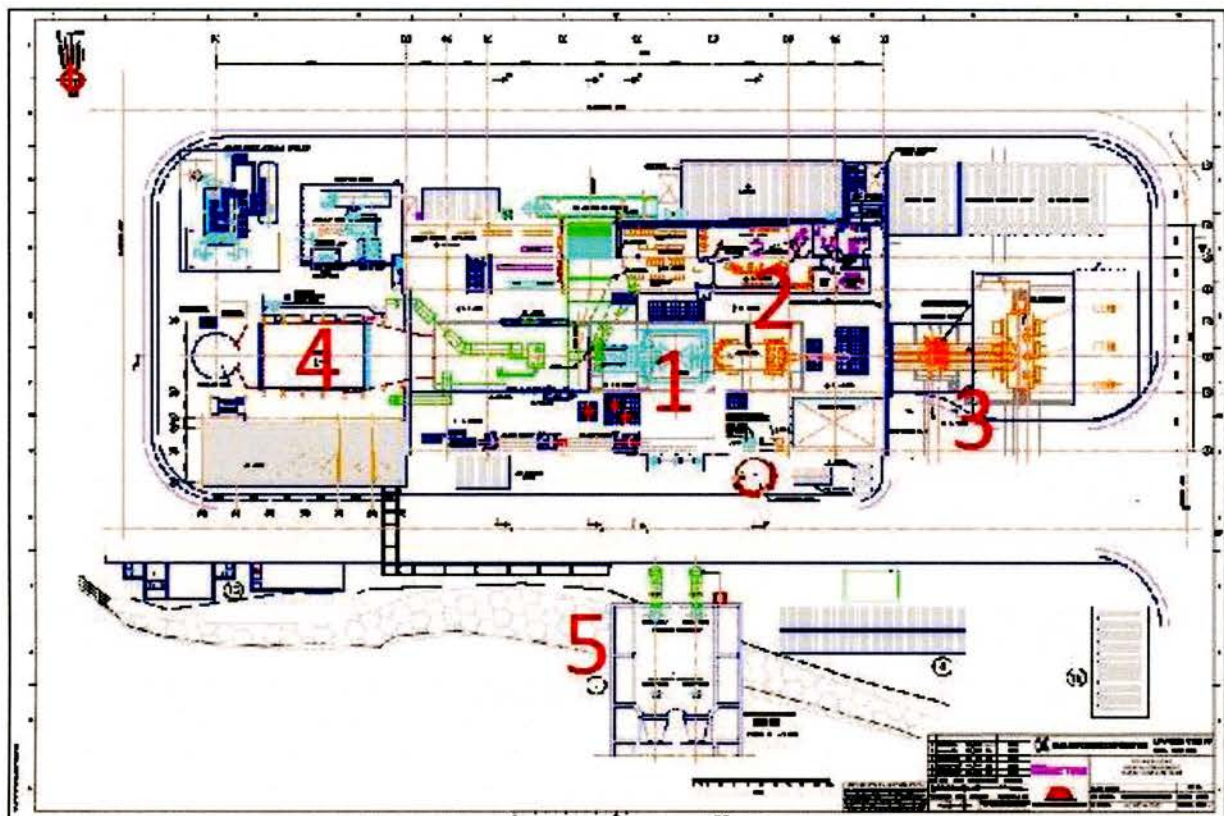
Σχήμα 5.2: Εξωτερική άποψη της μονάδας 5

## 5.2 Στοιχεία της μονάδας

Η μονάδα 5 του ενεργειακού κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής στο Λαύριο παράγει ενεργή ισχύ 374,4 MW, 83 MVAR άεργος ισχύ (cosφ 0,99) ενώ ο καθαρός βαθμός απόδοσης αγγίζει το 55,52 %. Η Μονάδα κατά την κατασκευή της είχε να επιδείξει ορισμένες πρωτιές στην Ελλάδα:

- Τη μεγαλύτερη γεννήτρια (σε kVA)
- Το μεγαλύτερο Μετασχηματιστή (σε kVA)
- Τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (%)

Η πρώτη έναυση έγινε το Φεβρουάριο του 2006, ενώ η έναρξη της εμπορικής λειτουργίας πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2006. Μέχρι σήμερα έχει περισσότερες από 31900 ώρες λειτουργίας και μετρά πάνω από 250 εκκινήσεις. Συνολικά η μονάδα μέχρι σήμερα έχει παράγει περίπου 10.265.000 MWh.



Πίνακας 5.1: Διάταξη της Μονάδας 5, Ε.Κ.Η. Λαυρίου

1) Αεριοστρόβιλος

Μοντέλο	S109FA
Κατασκευαστής	General Electric
Στροφές	3000 rpm
Καύσιμο	Φυσικό Αέριο
Συμπιεστής	15 Βαθμίδων
Στρόβιλος	3 Βαθμίδων
Βασικό φορτίο	255.600 KW
Ειδική κατανάλωση θερμότητας	6350 kJ/kWh
Θερμοκρασία εξαγωγής καυσιμών	625 C
Κατανάλωση καυσιμού	67.500 m <sup>3</sup> / h.
Βαθμός απόδοσης	37,9 %
NOx PPMVD @15%	02
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	15° C
Υγρασία	60 %
Ψύξη	Θαλασινό νερό

## 2) Ατμοστρόβιλος

Στρόβιλος 27 βαθμίδων, Υψηλής, Μεσαίας, Χαμηλής πίεσης με 17, 5, 5 βαθμίδες αντιστοίχως

Μοντέλο	D10
Κατασκευαστής	General Electric
Ονομαστική ισχύς	143.344 KW
Στροφές	3000rpm
Πίεση/ Θερμοκρασία Υ.Π	70bar/ 548°C
Πίεση Συμπυκνωτή	53mbar abs

## 3) Γεννήτρια

Μοντέλο	390 <sup>H</sup>
Κατασκευαστής	General Electric
Ονομαστική (φαινόμενη) ισχύς	468,8 MVA
Στροφές	3000rpm
<i>συν φ</i>	0,8
<i>Ενεργός ισχύς</i>	374,4 MW
Τάση Εξόδου	19 κV
Ένταση	14 κA
Ένταση Πεδίου	2 κA
Τάση διέγερσης	750 V
Ψύξη	Υδρογόνο

#### 4) Λέβητας

Λέβητας ανάκτησης θερμότητας, κύκλωμα νερού – ατμού, οριζόντιος φυσικής κυκλοφορίας, 3 πιέσεων (υψηλή, μεσαία, χαμηλή) με αναθέρμανση.

Κατασκευαστής	ALSTOM Power Italia SpA
Θερμοκρασία εισαγωγής καυσαερίων	625° C
Θερμοκρασία εξαγωγής καυσαερίων	110° C
Ροή Ατμού Υ.Π.	185 t/h
Ροή Ατμού Μ.Π.	118 t/h
Ροή Ατμού Χ.Π	44,3 t/h
Πίεση Ατμού Υ.Π	7 bar
Θερμοκρασία τροφοδοτικού νερού	106 °C

#### 5) Αντλίες Ύδροψύξης

2 Κύριες αντλίες θαλασσινού ύδατος (100% λειτουργία)

Κατασκευαστής	Flowserve Energia
Ροή Νερού	15.900 m <sup>3</sup> /h
Ισχύς	625 KW
Θερμοκρασία Εισοδού/ Εξόδου	28°/37° C

Σαν δευτερεύουσες μονάδες του σταθμού είναι οι παρακάτω:

#### Κεντρικός Θάλαμος Έλεγχου

Η μονάδα ελέγχεται και λειτουργεί δια μέσου του κεντρικού Θαλάμου Έλεγχου (CCR) με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Μερικές βασικές διαδικασίες έλεγχου και ρύθμισης είναι:

- Αναλόγια καύσιμου και αέρα για βέλτιστη καύση
- Θερμοκρασία και πίεση ατμού
- Θερμοκρασία καυσαερίων
- Εκπομπές ρύπων
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Συχνότητα μονάδος και συστήματος
- Αντιστάθμιση κραδασμών

Το DCS (σύγχρονο Κατανεμημένο Σύστημα Ελέγχου) είναι το I/A Series της Invensys SPA και το οποίο ελέγχει όλα τα συστήματα της Μονάδος εκτός από τον Αεριοστρόβιλο/ ατμοστρόβιλο/ Γεννήτρια, τα οποία ελέγχονται και ρυθμίζονται μέσω του κατανεμημένου συστήματος της General Electric, το SpeedTronic στην έκδοση 6. Μέσω του SpeedTronic γίνεται η εναυση της μονάδος σε πλήρες φορτίο σε χρόνο κάτω των 20 λεπτών. Η συνεργασία του DCS και του Speedtronic γίνεται μέσω Ethernet link.

## Σταθμός Παραλαβής και Μέτρησης Φυσικού Αερίου

Ο ΑΗΣ Λαυρίου για τη λειτουργία της μονάδας, προμηθεύεται το φυσικό αέριο από τη ΔΕΠΑ, η οποία εντός του σταθμού έχει εγκαταστήσει Σταθμό Παραλαβής και Μέτρησης Φυσικού Αερίου. Μετά τη διοχέτευση του καυσίμου από το σταθμό, εκείνο οδηγείται σε δύο Σταθμούς Υποδοχής όπου φιλτράρεται, αφυγραίνεται, προθερμαίνεται και ρυθμίζεται η πίεση του, ώστε οι αεροστρόβιλοι των μονάδων να λειτουργούν αποδοτικά. Το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται, είναι μίγμα προερχόμενο από τη Ρωσία και την Αλγερία και η ανάλυση ποιότητάς του, παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα.

Περιεκτικότητα %	Ρώσικο Φυσικό Αέριο	Αλγερινό Φυσικό Αέριο
Μεθάνιο (CH <sub>4</sub> )	98	91,2
Αιθάνιο (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0,6	6,5
Προπάνιο(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0,2	1,1
Βουτάνιο (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0,2	0,2
Πεντάνιο (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0,1	-
Άζωτο(N <sub>2</sub> )	0,8	1
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO <sub>2</sub> )	0,1	-
Ανωτέρα Θερμογόνος Δύναμη	8.600 εως 9.200 kcal/Nm <sup>3</sup>	9.640 εως 10.650 kcal/Nm <sup>3</sup>

*Πίνακας 6.1: Ποσοστιαία ανάλυση φυσικού αερίου*

Η πίεση του φυσικού αερίου είναι 38 bar στο δίκτυο, 23 bar πριν τη ρυθμιστική βαλβίδα υποβιβασμού και 19 bar προ των καυστήρων. Η θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης σε ονομαστικό φορτίο είναι 1200°C. Η κατανάλωση του φυσικού αερίου για τη μονάδα V σε συνθήκες ISO ανέρχεται σε 67.500m<sup>3</sup>/h. Σύμφωνα με υπολογισμούς, για τη λειτουργία της μονάδας χρειάζονται **400 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>** Φ.Α. ετησίως.

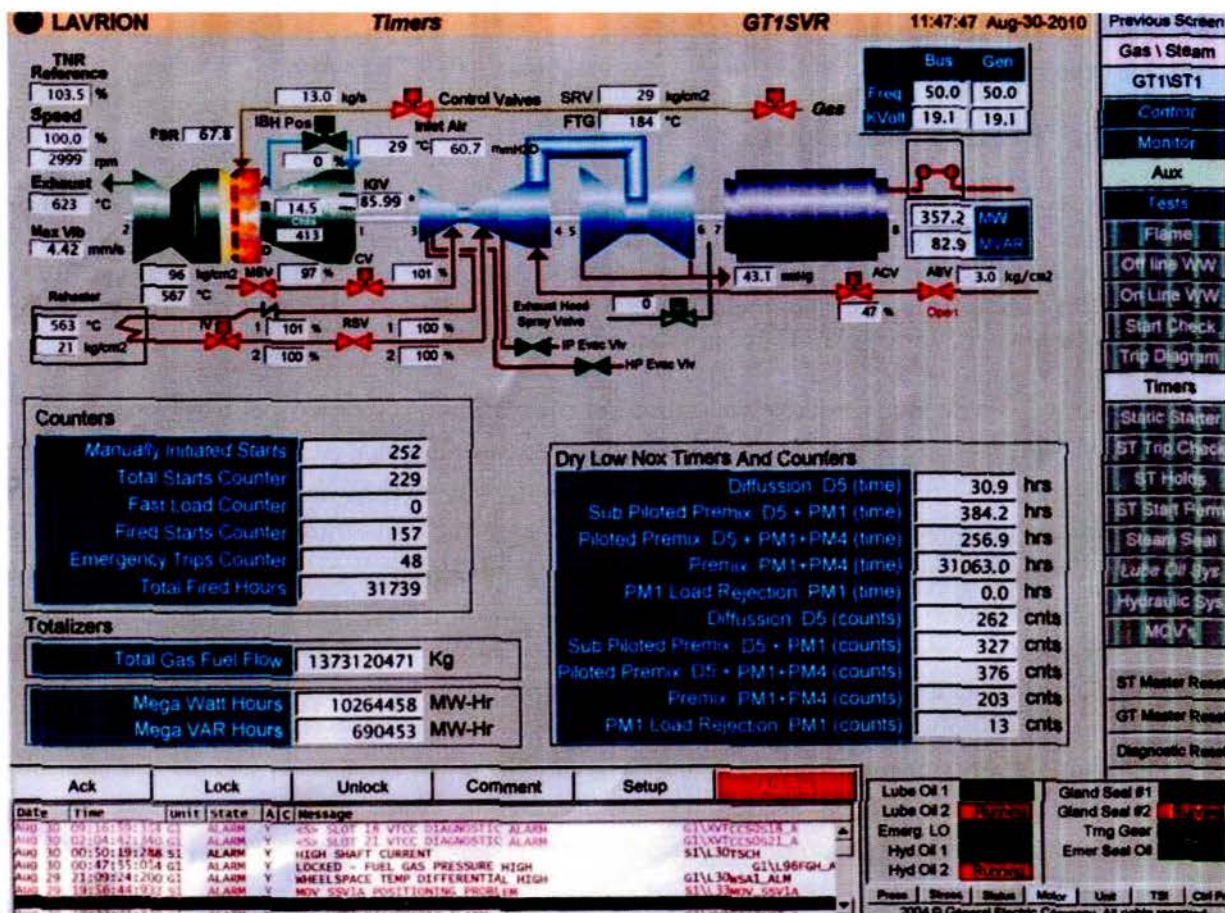
### Λιπαντικά

Σε ετήσια βάση σε όλο το Κέντρο χρησιμοποιούνται περίπου 25 τόνοι λιπαντικών. Τα λιπαντικά είναι συσκευασμένα σε βαρέλια των 200 kg και δοχεία των 20 kg. Ειδικά η μονάδα 5, χρησιμοποιεί 5 τόνους λιπαντικών ετησίως.

### 5.3 Λειτουργία της μονάδας

Η μονάδα 5 ανήκει στην κατηγορία των εργοστασίων παραγωγής ενδιάμεσου φορτίου. Είναι μονάδες που κλείνουν τις πρώτες πρωινές ώρες και παράγουν μέγιστη ισχύ κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης. Εβδομαδιαία λειτουργεί 5 X 24 ώρες ενώ ετήσια έχει 260 ημέρες λειτουργίας (6240 ώρες) . Ωστόσο λόγω της μεγάλης ευελιξίας της μονάδος μπορεί να





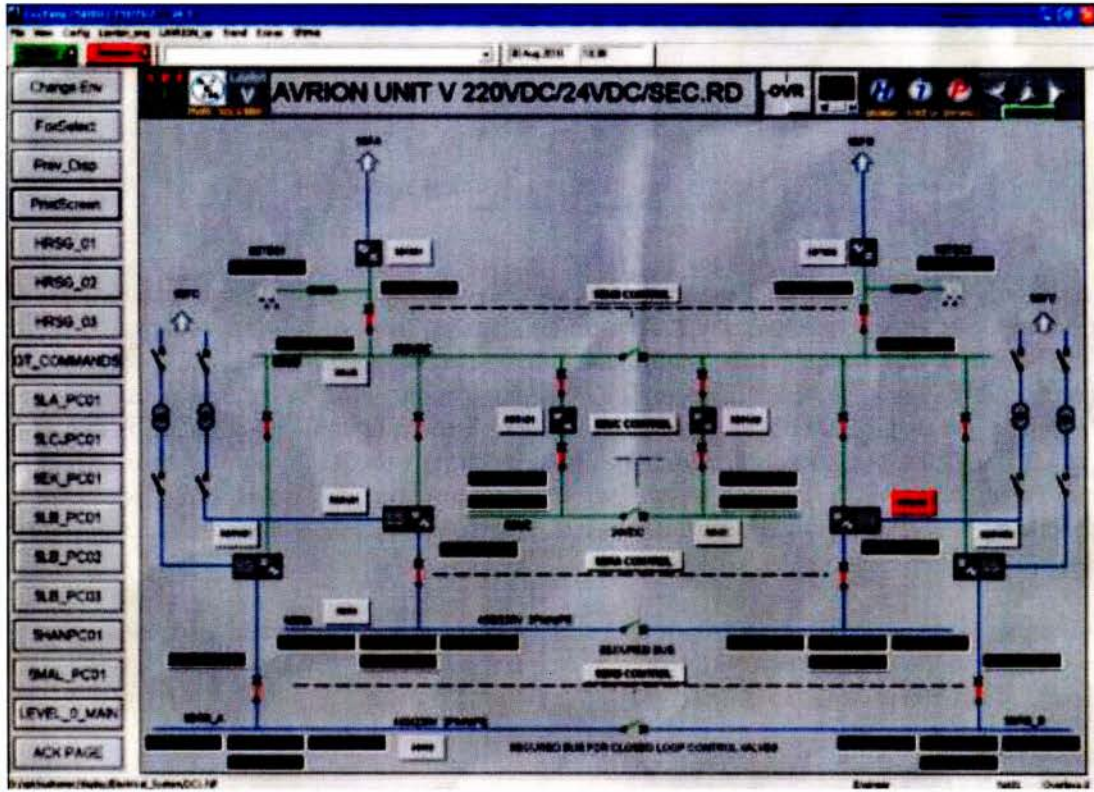
Σχήμα 5.6 : Ο σταθμός εν 'ώρα λειτουργίας

### 5.3.3 Σβέση

Η σβέση του σταθμού είναι πολύ απλή σε σχέση με την εκκίνηση. Υπάρχει μια σταδιακή και όχι απότομη μείωση των στροφών προκειμένου να ψηχθούν ομαλά όλα τα θερμά μέρη του εργοστάσιου. Και εδώ πάλι η όλη διαδικασία γίνεται αυτόματα μέσω του SpeedTronic. Αξιοσημείωτο είναι ότι ακόμα και όταν η μονάδα είναι ανενεργή ο κοινός άξονας περιστρέφεται με μια συχνότητα της τάξης των 20 rpm προκειμένου να μην υπάρξει εφελκυσμός λόγω του τεράστιου βάρους και μήκους (40m). Η ειδική αυτή ηλεκτρομηχανολογική κατασκευή ονομάζεται Κρίκος. Επίσης ένα τμήμα του ατμού παραμένει σε αναμονή προκειμένου να χρησιμοποιηθεί άμεσα κατά την επομένη εκκίνηση της μονάδας.

### 5.3.4 Ασφάλεια

Αν για κάποιο λόγο διακοπεί η ομαλή λειτουργία της μονάδας το σύστημα επόπτευσης και έλεγχου (SpeedTronic) αυτόματα θα κάνει σβέση του σταθμού. Πρωταρχικής σημασία για την ασφάλεια της μονάδας είναι η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο SpeedTronic, προκειμένου κάτω από όλες τις συνθήκες να γίνεται ο έλεγχος της μονάδας. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με φωτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών, είτε με εγκατεστημένες ανορθωτικές διατάξεις που μετατρέπουν το AC σε DC προκειμένου να τροφοδοτήσουμε κάποιους συγκεκριμένους ελεγκτές και αισθητήρες του συστήματος έλεγχου. Μια επιπλέον δικλίδα ασφάλειας είναι το και Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος ανάγκης των 6kV το οποίο σπάνια τίθεται σε λειτουργία, αλλά είναι πάντα σε αναμονή.



Σχημα 5.7 Στο σύστημα έλεγχου και ασφάλειας παρέχεται τάση 24V DC αδιάλειπτα

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

Από την εκπόνηση αυτής της μελέτης μπορούμε να εξάγουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Αν λάβουμε υπόψη ότι ο συνδυασμένος κύκλος λειτουργίας είναι πρακτικά ο συνδυασμός μιας ατμοηλεκτρικής (κύκλος Rankine) και μιας αεριοστροβιλικής (κύκλος Joule-Bryton) μονάδας, μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλα ποσοστά αξιοποίησης της δαπανώμενης ενέργειας. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι όταν ένας κύκλος λειτουργεί σε υψηλότερα θερμοκρασιακά επίπεδα από τον άλλο, η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται αξιοποιείται περαιτέρω από τον κύκλο όπου γίνεται η δεύτερη διεργασία. Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν κύκλοι με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα, καθώς τα πλεονεκτήματά τους μπορούν να συνδυαστούν.

*Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί.* Είναι σταθμοί φορτίου βάσης που λειτουργούν στο 90% του χρόνου, παράγοντας αποδοτικά χαμηλού κόστους ηλεκτρική ενέργεια. Έχουν μικρό κόστος καύσιμων (λιγνίτης) ενώ φτάνουν σε ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης (90%).

*Αεριοστροβιλικοί σταθμοί.* Χρησιμοποιούνται κυρίως σαν σταθμοί αιχμής φορτίου. Λειτουργούν μεταξύ 1% και 20% του χρόνου και μόνον κατά τις περιόδους αιχμής της ζήτησης φορτίου. Επίσης παρουσιάζουν και τα εξής πλεονεκτήματα:

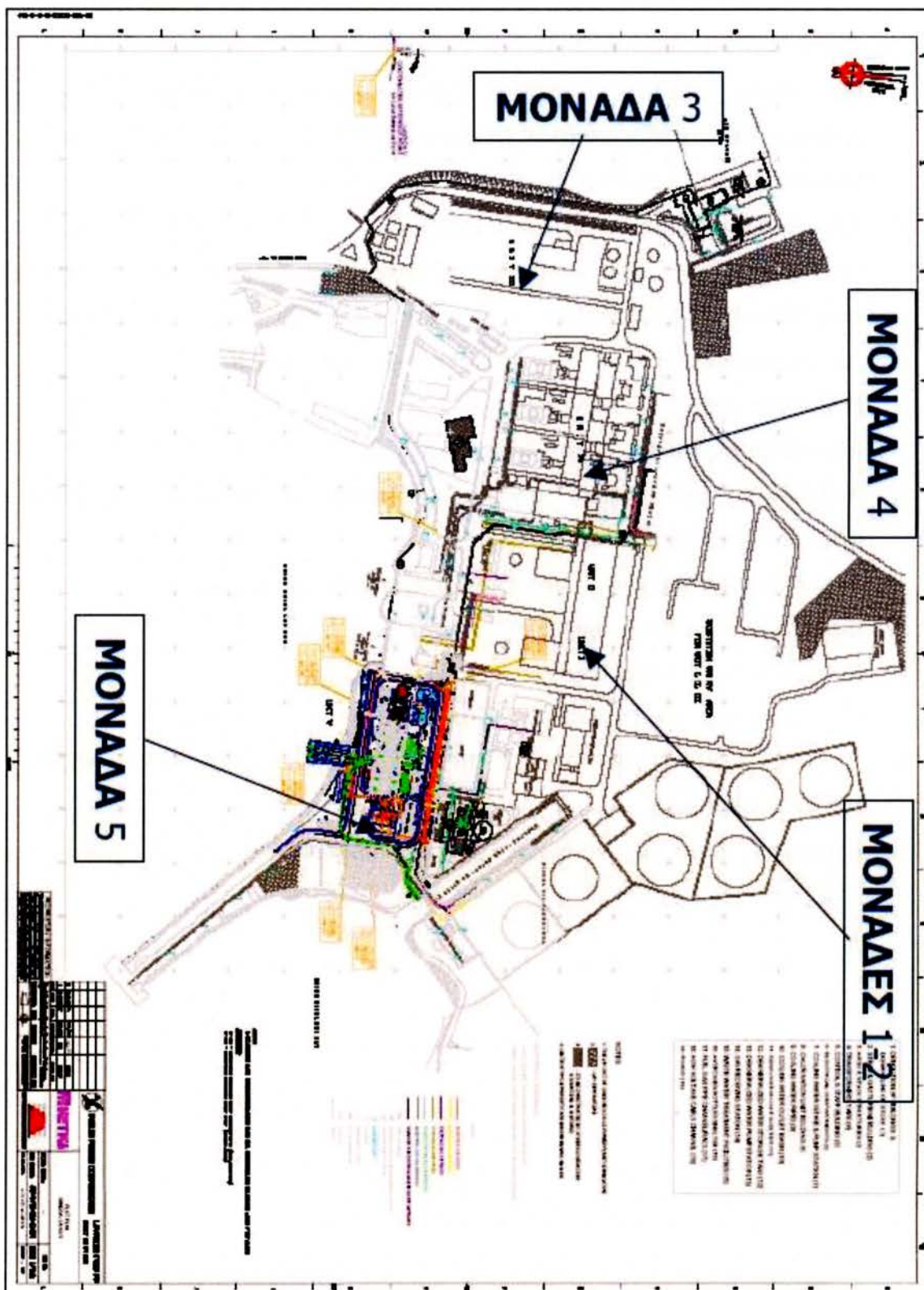
- Συμπαγής και με λίγα βοηθητικά εξαρτήματα κατασκευή
- Υψηλός βαθμός διαθεσιμότητας τους
- Μικρός αριθμός απαιτούμενου προσωπικού
- Μικρός χώρος εγκατάστασης
- Μικρό συνολικά βάρος ανά μονάδα ισχύος
- Μικρές έως μηδενικές ανάγκες σε νερό
- Χαμηλή δαπάνη για την προμήθεια και την εγκατάσταση τους ανά KW ισχύος
- Μικρός χρόνος που απαιτείται για την εκκίνηση και την ανάληψη του πλήρες φορτίου
- Μικρές δαπάνες για την αυτοματοποίηση της λειτουργίας και τον έλεγχο από απόσταση.

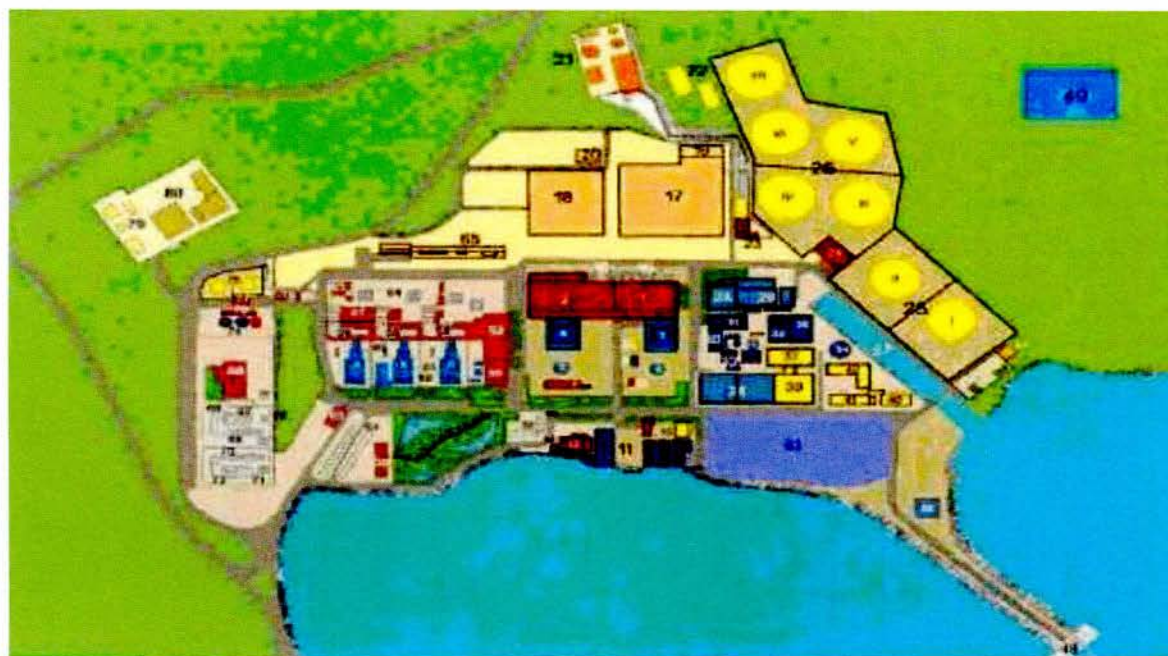
*Συνδυασμένος κύκλος.* Όπως προαναφέραμε ο συνδυασμένος κύκλος λειτουργίας έχει τα πλεονεκτήματα των θερμικών κύκλων που ενεργούν. Η ευελιξία και η απόδοση είναι επίσης κάτι που χαρακτηρίζει αυτό το είδος των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Μπορούν από σταθμοί ενδιάμεσου φορτίου να μετατραπούν σε σταθμούς αιχμής αν υπάρξουν έκτακτες ανάγκες. Παράλληλα η τεχνολογία έχει προσφέρει τα μέγιστα στην αύξηση της απόδοσης, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει ξεπεράσει το 60%.

## Βιβλιογραφία

1. Gas Turbine Handbook, Third edition: Principles and Practice - Tony Giampaolo
2. Steam Plant Calculations Manual, V. Ganapathy
3. Gas Turbine Engineering Handbook, Third Edition Meherwan P Boyce Fellow  
American Society of Mechanical Engineers (ASME USA) and Fellow The Institute of  
Diesel and Gas Turbine Engineers (IDGTE U.K.)
4. Advanced Gas Turbine Cycles, J.H. Horlock
5. Combined - Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants - Rolf Bachmann, Henrik Nielse,  
Judy Warner, Rolf Kehlhofer
6. An Encyclopedia of the History of Technology - Ian McNeil
7. Ιστοσελίδα της Δ.Ε.Η. [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
8. Ιστοσελίδα της ΜΕΤΚΑ . <http://www.metka.gr/>
9. Ανάλυση δυναμικής συμπεριφοράς σταθμού συνδυασμένου κύκλου - Διπλωματική  
Εργασία - Ιωάννης Κ. Μάντζαρης
10. Power Plant Engineering - Larry Drbal, Kayla Westra, Pat Boston
11. Ιστοσελίδα της Δ.Ε.Π.Α. <http://www.depa.gr/>
12. Ιστοσελίδα της General Electric. <http://www.ge.com>
13. GE Combined Cycle Experience - Chris E. Maslak. Leroy Tomlinson
14. ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ - Ευάγγελος Καρέλας, Ιωάννης Τριαντάφυλλος,  
Γρηγόριος Φρέσκος
15. Σημειώσεις Ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικής οικονομίας – Δ.Ν. Διαμαντόπουλος,  
ΑΤΕΙ Πειραιά, ΣΤεΦ.

# Παράρτημα





- |  |   |   |
|--|---|---|
| 1. Μηχανοστάσιο Μονάδας I                                  | 28. Δικαιτητήριο                            | 62. Καπνοδόχοι Λεβήτων  |
| 2. Μηχανοστάσιο Μονάδας II                                 | 29. Χώροι ιγμενής - Αποδιτήρια              | 63. Κύριο Γεννήτριας Ανάγκης (Black Start Diesel)                             |
| 3. Λεβητοστάσιο Μονάδας I                                  | 30. Χρηείο                                  | 64. Κύριοι και Βοηθητικοί ΜΣ Μονάδας IV                                       |
| 4. Λεβητοστάσιο Μονάδας II                                 | 31. Κύριο σφραλατωμένο νερό                 | 65. Υποσταθμός κλειστού πίεου 400kV (GIS)                                     |
| 5. Καπνοδόχος Μονάδας I                                    | 32. Αποστακτήρες θαλασσινού νερού           | 66. Αίθουσα Αεροστροβίλου - Μηχανοστασίου Μονάδας & Κύριο Ελέγχον Μονάδας III |
| 6. Καπνοδόχος Μονάδας II                                   | 33. Δεξαμενές νερού                         | 67. Λέβητες Ανακίνησης Θερμότητας Νο 1, Μονάδας III                           |
| 7. Ενδιάμεσος σταθμός περιεργολογής βιομηχανικών αποβλήτων | 34. Δεξαμενή ασφαλισμένου νερού             | 68. Καπνοδόχος Λέβητα Νο 1 Μονάδας III  |
| 8. Δεξαμενή (100 m <sup>3</sup> ) και Αντλιοστάσιο Diesel  | 35. Κύριο διεκτίστη νερού                   | 69. Αεροστροβίλος Νο 1, Μονάδας III   |
| 9. Αεροσυμπιεστές  | 36. Κύριο εγκαταστάσεων σφραλατωμένο        | 70. Αεροστροβίλος Νο2, Μονάδας III  |
| 10. Παραγωγή Υδρογόνου                                     | 37. Αποθήκη                                 | 71. Λέβητες Ανακίνησης Θερμότητας Νο 2, Μονάδας III                           |
| 11. Αντλιοστάσιο Νερού Ψαξίας Μονάδας 1,2,3 & 4            | 38. Μηχανουργείο - Ηλεκτρολογείο            | 72. Καπνοδόχος Λέβητα Νο 2, Μονάδας III                                       |
| 12. Ηλεκτρολογικός κώρος υδροληψίας                        | 39. Αποθήκη                                 | 73. Κύριοι και Βοηθητικοί ΜΣ Μονάδας III                                      |
| 13. Χλωριωτές - Δεξαμενές υποχλωριώδους Νατρίου            | 40. Αποθήκη                                 | 74. Δεξαμενές Αφραλατωμένου νερού   |
| 14. Παραγωγή κλωρίου - Δεξαμενή υποχλωριώδους Νατρίου      | 41. Συνεργείο Οχημάτων - Αποθήκη            | 75. Δεξαμενές Diesel και Αντλιοστάσιο Diesel                                  |
| 15. Κύριοι και Βοηθητικοί ΜΣ Μονάδας I                     | 42. Ξυλοουργείο - Βαφείο                    | 76. Αντλιοστάσιο νερού αναλήψης, Water injection και Αντλίες διαβροχής ΜΣ     |
| 16. Κύριοι και Βοηθητικοί ΜΣ Μονάδας II                    | 43. Υπό κατασκευή Μονάδα V                  | 77. Αντλιοστάσιο Diesel   |
| 17. Υποσταθμός 150 kV                                      | 44. Αποθήκη                                 | 78. Κύριο Μηχανολογικός Συντήρησης  |
| 18. Υποσταθμός 400 kV                                      | 45. Αποθήκη                                 | 79. Κύριο σταθμού σφραλατωμένο με ΔΕΠΑ  |
| 19. Υποσταθμός 20 kV τοπικής διανομής                      | 46. Αρχαίο Κύριο Αργυρούχοι Μαλεβδου        | 80. Σταθμός Υποδιανομής πίεσης - Μάρνησης Ψυχρού Αερίου                       |
| 20. Α-ΜΣ 400/150 kV  | 47. Εγκατάσταση Βιολογικού Καθαρισμού       |   |
| 21. Κύριο επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων              | 48. Προβλήτα                                |   |
| 22. Αποθήκες   | 49. Δεξαμενές Νερού                         |   |
| 23. Κύριο επεξεργασίας πετρελαίου καύσης                   | 50. Κύριο γραφείο                           |   |
| 24. Αντλιοστάσιο Πετρελαίου                                | 51. Χώρος στάθμευσης οχημάτων               |   |
| 25. Δεξαμενές Diesel (I, II)                               | 52. Κύρια Είσοδος                           |   |
| 26. Δεξαμενές Μαζού (III - VII)                            | 53. Αίθουσα Αεροστροβίλων Μονάδας IV        |   |
| 27. Αποχετευτικά πύργος ψυκτικού νερού                     | 54. Αεροστροβίλος Νο 1                      |   |
|  | 55. Αεροστροβίλος Νο 2                      |   |
|  | 56. Αεροστροβίλος Νο 3                      |   |
|  | 57. Κύριο Ελέγχον Αεροστροβίλων             |   |
|  | 58. Αίθουσα Αεροστροβίλου - Μηχανοστάσιο    |   |
|  | 59. Κύριο ελέγχον Μονάδας IV                |   |
|  | 60. Παρακαμητήριοι Καπνοδόχοι               |   |
|  | 61. Λέβητες ανακίνησης Θερμότητας (A, B, C) |   |

Τοπογραφικά Διάγραμμα Ενεργειακού Κέντρου Λαυρίου