

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

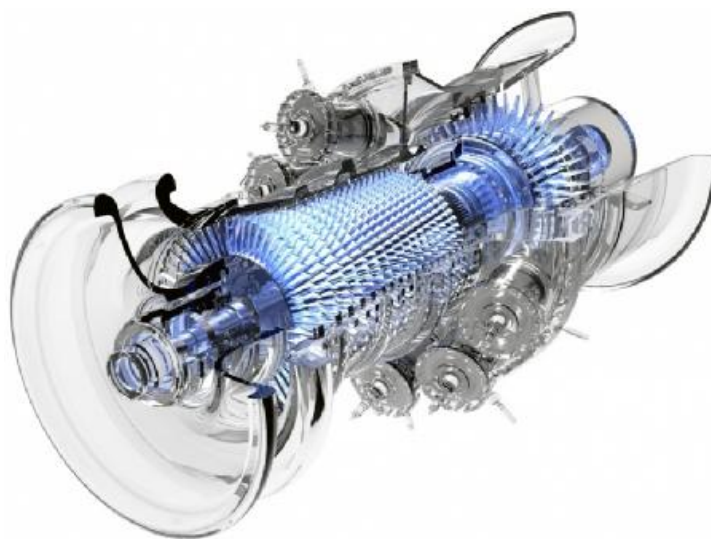
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Οικονομοτεχνική ανάλυση επένδυσης μονάδας  
συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας.  
Συγκριτική μελέτη συνδυασμένου κύκλου και  
μηχανών εσωτερικής καύσης»**



**ΣΩΚΡΑΤΗΣ Β. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ. ΚΑΜΠΟΥΡΙΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ, ΜΑΪΟΣ 2012**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Καμπουρίδη, Καθηγητή του τμήματος Μηχανολογίας του ΤΕΙ Πατρών για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Ι. Τσεκούρα, Μηχανολόγο Μηχανικό για την καθοδήγηση στα αρχικά στάδια της εργασίας και για τις γνώσεις που μου μετέφερε.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Α. Καλογεράκη, Μηχανολόγο Μηχανικό και φορέα της πρακτικής μου άσκησης για τη χρήσιμη βιβλιογραφία που μου παρείχε και για τις γνώσεις που αποκόμισα αυτούς τους έξι μήνες.

Σωκράτης Β. Παπαδόπουλος

Πάτρα, Μάιος 2012

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας Πτυχιακής εργασίας είναι η οικονομική ανάλυση και ο έλεγχος βιωσιμότητας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (ΣΗΘ) στην περιοχή της Κορίνθου. Τα παραγόμενα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας θα πωλούνται στον ΔΕΣΜΗΕ, ενώ η θερμότητα θα αξιοποιείται σε ίδιες χρήσεις ή θα διοχετεύεται σε παρακείμενες βιομηχανίες.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στους αρμόδιους φορείς για τη διαχείριση του εθνικού συστήματος ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λειτουργία της μονάδας.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια εκτενή ανάλυση των συστημάτων που επιλέχθηκαν για την κάλυψη των φορτίων. Αναφέρονται οι αρχές λειτουργίας ηλεκτροπαραγωγής με μηχανές εσωτερικής καύσης και με μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μονάδα συνδυασμένου κύκλου, μια ανερχόμενη τεχνολογία, της οποίας τα μέρη αναλύονται λεπτομερώς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γενικές αρχές της συμπαραγωγής και αναλύονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται εκτενής οικονομική ανάλυση του συστήματος, Αφού πραγματοποιηθεί η μελέτη βιωσιμότητας, προκύπτουν οι βέλτιστες δυνατές τεχνολογίες και υπολογίζονται τα ετήσια έσοδα και έξοδα, βάσει των διακυμάνσεων της αγοράς. Τέλος, απεικονίζεται σε διαγράμματα η χρηματοροπή της επένδυσης και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Εισαγωγή</b>	
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	6
1.2 Ενεργειακό πρόβλημα.....	6
1.3 Ανεξάρτητοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας.....	7
1.3.1 Ρυθμιστική αρχή ενέργειας.....	7
1.3.2 Διαχειριστής ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	8
<b>2. Καύσιμα</b>	
2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Αέρια καύσιμα.....	9
2.2.1 Γενικά.....	9
2.2.2 Φυσικό αέριο.....	10
2.3 Υγρά καύσιμα.....	12
2.3.1 Γενικά.....	12
2.3.2 Πετρέλαιο Diesel.....	13
2.3.3 Μαζούτ.....	15
2.4 Συγκεντρωτικός πίνακας εκπομπών.....	16
<b>3. Τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής</b>	
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ).....	17
3.2.1 Κύκλος Otto.....	19
3.2.2 Κύκλος Diesel.....	20
3.2.3 Αρχή λειτουργίας 2-χρονης ΜΕΚ.....	21
3.2.4 Αρχή λειτουργίας 4-χρονης ΜΕΚ.....	22
3.2.5 Κύρια μέρη εγκατάστασης.....	24
3.2.6 Μείωση εκπομπών NO <sub>x</sub> .....	27
3.2.7 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα ηλεκτροπαραγωγής με ΜΕΚ...27	
3.3 Συνδυασμένος κύκλος.....	30
3.3.1 Γενική περιγραφή.....	30
3.3.2 Αεριοστρόβιλος.....	32
3.3.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	32
3.3.2.2 Συμπιεστής.....	35
3.3.2.3 Θάλαμος καύσης.....	36
3.3.2.4 Στρόβιλος.....	37
3.3.2.5 Βελτιώσεις κύκλου Joule-Brayton.....	38
3.3.3 Λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HRSG).....	40

3.3.3.1 Γενική περιγραφή.....	40
3.3.3.2 Λέβητας ανάκτησης θερμότητας με συμπληρωματική καύση.....	43
3.3.3.3 Διάταξη λέβητα ανάκτησης θερμότητας.....	43
3.3.4 Ατμοστρόβιλος.....	46
3.3.4.1 Κατηγοριοποίηση ατμοστρόβιλων.....	46
3.3.4.2 Βελτιώσεις κύκλου Rankine.....	48
3.3.5 Αντλίες.....	50
3.3.6 Συμπυκνωτής.....	51

#### **4. Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας (ΣΗΘ)**

4.1 Γενικά.....	52
4.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	54
4.2 Σύγχρονες τεχνολογίες συμπαραγωγής.....	54
4.2.1 Συστήματα συμπαραγωγής ατμοστρόβιλων.....	55
4.2.2 Συστήματα συμπαραγωγής αεριοστρόβιλων.....	55
4.2.3 Συστήματα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου.....	58
4.2.4 Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης.....	58
4.2.5 Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.....	59
4.2.6 Συστήματα συμπαραγωγής με παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης.....	60
4.2.7 Λοιπά συστήματα συμπαραγωγής.....	63
4.3 Μέθοδοι ρύθμισης ισχύος.....	64

#### **5. Οικονομοτεχνική ανάλυση μονάδας συμπαραγωγής**

5.1 Μελέτη σκοπιμότητας.....	65
5.1.1 Γενικά.....	65
5.1.2 Στοιχεία τοποθεσίας.....	66
5.1.3 Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου.....	66
5.1.4 Μηχανές εσωτερικής καύσης.....	67
5.1.4.1 Σύγκριση 2-χρονων και 4-χρονων μηχανών.....	68
5.1.4.2 Επιλογή αριθμού MEK.....	70
5.1.5 Προτεινόμενες λύσεις.....	71
5.1.5.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης.....	71
5.1.5.2 Συνδυασμένος κύκλος.....	72
5.2 Οικονομική μελέτη εγκατάστασης.....	72
5.2.1 Εισαγωγή.....	72
5.2.2 Πληθωρισμός.....	73
5.2.2.1 Πληθωρισμός ηλεκτρικής ενέργειας.....	74
5.2.2.2 Πληθωρισμός καυσίμου.....	75
5.2.2.3 Πληθωρισμός κόστους συντήρησης.....	75
5.2.3 Ανάλυση μεθοδολογίας υπολογισμών.....	76
5.2.3.1 Υπολογισμός εξόδων.....	76
5.2.3.1.1 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης.....	76

5.2.3.1.2	Απόσβεση.....	76
5.2.3.1.3	Κόστος καυσίμου.....	77
5.2.3.1.4	Έξοδα προσωπικού.....	79
5.2.3.1.5	Ασφάλειες.....	79
5.2.3.1.6	Κόστος ιδίων κεφαλαίων.....	79
5.2.3.2	Υπολογισμός εσόδων.....	80
5.2.3.2.1	Έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας.....	80
5.2.3.2.2	Έσοδα θερμικής ενέργειας.....	81
5.2.3.2.2.1	Υπολογισμός εσόδων για ΜΕΚ.....	81
5.2.3.2.2.2	Υπολογισμός εσόδων για συνδυασμένο κύκλο.....	83
5.2.3.2.2.3	Επιδότησεις.....	84
5.2.3.2.2.4	Φορολογία.....	86
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	87
5.3.1	Μηχανές εσωτερικής καύσης.....	87
5.3.2	Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου.....	92
5.4	Συμπεράσματα.....	95

## **Βιβλιογραφία**

## **Παραρτήματα**

Παράρτημα Α.....	99
Παράρτημα Β.....	101

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Όταν το 1769 ο Βρετανός James Watt δημιούργησε την πρώτη ατμομηχανή εισήγαγε τον όρο ‘ενέργεια’ στην ανθρωπότητα και σήμανε την αρχή της Βιομηχανικής Επανάστασης. Οι ενεργειακές ανάγκες αυξήθηκαν και γίνεται επιτακτική η αναζήτηση νέων πηγών. Η αυξημένη αυτή ζήτηση εξυπηρετείται από το λιθάνθρακα, το πετρέλαιο και τις υδατοπτώσεις.

Ταυτόχρονα άρχισε και η εντατικότερη έρευνα για πρακτική εκμετάλλευση του ηλεκτρισμού. Το 1882 τίθενται σε λειτουργία οι πρώτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε Λονδίνο και Νέα Υόρκη ισχύος 60 kW και τάσης 110 V. Η παροχή των μονάδων γινόταν με συνεχές ρεύμα και αυτός είναι ο λόγος που τροφοδοτούσε μόνο γειτονικούς καταναλωτές.

Ο Nikola Tesla επινόησε ένα εναλλακτικό σύστημα χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο Tesla παρατήρησε πως όταν διπλασίαζε την τάση, διχοτομούσε το ρεύμα και οι απώλειες μειώνονταν κατά  $\frac{3}{4}$ . Αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη υψηλών τάσεων για την ασφαλή μεταφορά του ρεύματος σε απομακρυσμένους καταναλωτές. Το εναλλασσόμενο ρεύμα και η αύξηση της τάσης ώθησαν τον ηλεκτρισμό σε παγκόσμια εξάπλωση.

Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια ήταν τόσο αυξημένες που πλέον ο ηλεκτρισμός έχει καθιερωθεί σαν είδος πρώτης ανάγκης.

## 1.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η αφειδής κατανάλωση ενέργειας οδήγησε στο σημερινό οικολογικό και ενεργειακό πρόβλημα.

Το οικολογικό πρόβλημα αφορά τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα παράγωγα της καύσης υδρογονανθράκων. Η υψηλή συγκέντρωση CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> στα άνω στρώματα της ατμόσφαιρας λειτουργεί σαν μόνωση, επιτρέποντας στις υπεριώδεις ακτίνες φωτός του Ήλιου να εισέλθουν στη Γη αλλά εγκλωβίζοντας τη θερμότητα.

Το αποτέλεσμα από αυτή την αύξηση θερμοκρασίας είναι το γνωστό «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Παρατηρήθηκε ότι κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα η θερμοκρασία του πλανήτη αυξήθηκε κατά 0,6 °C υπολογίζεται αύξηση 1,4-5,8 °C έως το 2100 (συγκριτικά με το 1990), πράγμα ολέθριο για τη ζωή στον πλανήτη.

Το ενεργειακό πρόβλημα έχει να κάνει με τα πεπερασμένα αποθέματα ορυκτού πλούτου. Η χαμηλή τιμή του πετρελαίου και η αξιοπιστία του σαν καύσιμο περιόρισαν την έρευνα για νέες πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Πλέον όμως, όλα τα κοιτάσματα πετρελαίου έχουν χαρτογραφηθεί και τα αποθέματα θα εξαντληθούν σε λίγα σχετικά χρόνια.

Για την επίλυση των παραπάνω οι κυβερνήσεις παγκοσμίως έχουν μεριμνήσει με:

- Το πρωτόκολλο του Κyoto, μια συμφωνία που υπεγράφη μεταξύ 171 χωρών και αφορά μια σειρά νομικών δεσμεύσεων από 39 βιομηχανοποιημένες χώρες για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>.
- Την Ευρωπαϊκή οδηγία της 17/12/2008, όπου τίθεται ως στόχος για το 2020 η μείωση 20% των αερίων του θερμοκηπίου, η 20% αύξηση ενεργειακής αποδοτικότητας και 20% αύξηση της συμβολής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας.

### **1.3 ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Από το Φεβρουάριο του 2001 ξεκίνησε η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (Ν. 2773/1999). Ο νόμος εφαρμόζει την Ευρωπαϊκή Οδηγία 96/92 και προβλέπει τα εξής :

- Είσοδο στην αγορά ανεξάρτητων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας, ανταγωνιστών της ΔΕΗ.
- Δυνατότητα πρόσβασης τρίτων στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής.
- Προτεραιότητα εισαγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο.



### **1.3.1 Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας**

Βάσει του νόμου 2773 δημιουργήθηκε μια ανεξάρτητη διοικητική αρχή για τη γενική εποπτεία του ελληνικού ηλεκτρικού συστήματος, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Σκοπός της ΡΑΕ είναι να διευκολύνει τον υγιή ανταγωνισμό στην αγορά ενέργειας ώστε να διευκολύνεται ο καταναλωτής.

Επίσης, η ΡΑΕ εξυπηρετεί του μακροχρόνιους στρατηγικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής και το δημόσιο συμφέρον. Τέτοιοι στόχοι είναι η αξιόπιστη και επαρκής τροφοδοσία ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές, η προστασία του περιβάλλοντος, η εισαγωγή ΑΠΕ στο σύστημα και η εξασφάλιση επαρκούς υποδομής για την ενέργεια.

Τέλος, η ΡΑΕ αναλαμβάνει διεθνείς συνεργασίες με χώρες των Βαλκανίων και της ευρύτερης Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου επιχειρούνται θεσμικές αλλαγές με στόχο την ενιαία ανταγωνιστική εσωτερική αγορά ενέργειας.

### **1.3.2 Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Ο ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) ιδρύθηκε με το Προεδρικό Διάταγμα 328/12.12.2000. Είναι ανώνυμη εταιρεία του Δημοσίου και ευθύνεται για την ισότιμη μεταφορά ενέργειας στους χρήστες του συστήματος. Σύμφωνα με το καταστατικό του, ο ΔΕΣΜΗΕ έχει σαν σκοπό τη λειτουργία, την εκμετάλλευση, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του εθνικού συστήματος μεταφοράς ενέργειας, καθώς και τη διασύνδεσή του με άλλα δίκτυα ώστε να εξασφαλίζεται ο επαρκής, ασφαλής και οικονομικά αποδοτικός τρόπος εφοδιασμού της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΥΣΙΜΑ

## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο, φωταέριο)
- Υγρά καύσιμα ( πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη)
- Στερεά καύσιμα (λιγνίτης, άνθρακας, RDF)

Τα στερεά καύσιμα δεν καλύπτουν τις ανάγκες των τεχνολογιών που μας ενδιαφέρουν στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρά μόνο με εξειδικευμένες τεχνικές και για το λόγο αυτό δεν θα γίνει αναφορά στο συγκριμένο κεφάλαιο.

Το είδος του καυσίμου που επιλέγεται για μια μονάδα εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων, όπως η τοπική διαθεσιμότητα, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, η νομοθεσία, ο τύπος του καυστήρα, το σύστημα επεξεργασίας καυσίμου και το κεφάλαιο επένδυσης.

Κατά την καύση η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε θερμική. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση ενός  $\text{kmol}$  καυσίμου καλείται θερμογόνος δύναμη. Για ευχέρεια στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι μονάδες  $\text{KJ/kg}$  ή  $\text{KJ/m}^3$ . Ανώτερη θερμογόνος δύναμη ( $H_o$ ) ονομάζεται η αποδιδόμενη θερμότητα κατά την τέλεια καύση, με μόνα προϊόντα  $\text{CO}_2$  και νερό και οι υδρατμοί να έχουν συμπυκνωθεί σε θερμοκρασία  $25^\circ\text{C}$ , ώστε να έχουν αποδώσει όλη τη λανθάνουσα θερμότητα. Αν ο ατμός δεν συμπυκνωθεί τότε το ποσό της θερμότητας καλείται κατώτερη θερμογόνος δύναμη ( $H_u$ ).

## 2.2 ΑΕΡΙΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

### 2.2.1 Γενικά

Αέριο καύσιμο καλείται οποιοδήποτε αέριο είναι ικανό να παράγει ενέργεια με την καύση του. Τα αέρια καύσιμα εξορύσσονται ή παράγονται από επεξεργασία στερεών καυσίμων. Το πιο γνωστό αέριο καύσιμο είναι το φυσικό αέριο. Άλλα αέρια καύσιμα είναι το βουτάνιο, το προπάνιο, το syngas (σύνθεση μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου), ο αεριοποιημένος άνθρακας και το αέριο (προϊόντα από αεριοποίηση άνθρακα και βιόμαζας αντίστοιχα).

## 2.2.2 Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι μίγμα υδρογονανθράκων σε αέρια κατάσταση, αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο (σε ποσοστό άνω του 85%), που είναι ο ελαφρύτερος υδρογονάνθρακας, είναι πολύ καθαρό, χωρίς προσμίξεις και θειούχα συστατικά. Συναντάται είτε κοντά σε περιοχές εξόρυξης φυσικού πετρελαίου, είτε σε αυτοτελή κοιτάσματα συσσωρευμένων υδρογονανθράκων. Στην πρώτη περίπτωση το μίγμα είναι πλούσιο σε βουτάνιο, περιέχει βαρύτερους υδρογονάνθρακες  $C_4^+$  και καλείται «υγρό αέριο». Αν η πηγή του δεν βρίσκεται κοντά σε πετρελαιοπηγή το κλάσμα  $C_4^+$  είναι περιορισμένο.

Το φυσικό αέριο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, λόγω του ότι τα παγκόσμια αποθέματα είναι γιγαντιαία (περίπου 4000 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια). Επίσης, χαρακτηρίζεται ως μη ρυπογόνο καύσιμο με μεγάλη θερμογόνο δύναμη.

Η σύσταση του φυσικού αερίου διαφέρει ανάλογα με την πηγή προέλευσής του.

Οι προδιαγραφές του φυσικού αερίου για κανονική κατάσταση (θερμοκρασία 273,15 K και πίεση 1,01325 bar) δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Μεθάνιο ( $CH_4$ )	Min 85%
Αιθάνιο ( $C_2H_6$ )	Max 8,6%
Προπάνιο ( $C_3H_8$ )	Max 3%
Βουτάνια	Max 2%
Πεντάνια και άλλοι υδρογονάνθρακες	Max 1%
Άζωτο ( $N_2$ )	Max 5%
Διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ )	Max 3%

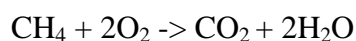
**Πίνακας 2.1 : Χημική σύσταση φυσικού αερίου (Πηγή: ΔΕΠΑ)**

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 0,55. Σε περίπτωση διαρροής, διαχέεται και διαφεύγει άμεσα προς την ατμόσφαιρα.

Τα όρια ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι 4,5% - 15%. Δηλαδή, η καύση δεν μπορεί να συντηρηθεί εάν η περιεκτικότητα του αέρα σε φυσικό αέριο είναι εκτός αυτών των ορίων. Επιπλέον η θερμοκρασία ανάφλεξης ορίζεται στους 650-670 °C.

Λόγω της σύστασής του κατά την καύση του έχει τη χαμηλότερη εκπομπή ρύπων από όλα τα συμβατικά καύσιμα. Επίσης, δεν περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα συνεπώς δεν είναι τοξικό, πράγμα που φαίνεται και από τον χημικό του τύπο.

Παίρνοντας σαν δεδομένο πως το φυσικό αέριο αποτελείται κατά 85-90% από μεθάνιο η καύση του θα έχει χημικό τύπο CH<sub>4</sub>. Συνεπώς κατά την καύση του φυσικού αερίου θα ισχύει ο παρακάτω τύπος:



Από τον χημικό του τύπο βλέπουμε ότι το κύριο ρυπογόνο παράγωγο της καύσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα.

Η τιμή της θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου εξαρτάται από τη σύστασή του.

Σαν μέση τιμή ανωτέρας θερμογόνου δύναμης (ΑΘΔ) έχουν ορισθεί οι 41 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Κατωτέρα θερμογόνος δύναμη (ΚΘΔ) έχουν ορισθεί οι 37 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Το φυσικό αέριο έχει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα καύσιμα:

1. Η χρήση του δεν απαιτεί ιδιαίτερη επεξεργασία.
2. Η διανομή είναι συνεχής και γίνεται μέσω αγωγών γι' αυτό δεν χρειάζεται αποθήκευση.
3. Οι ρύποι είναι ελαττωμένοι και η καύση φιλικότερη προς το περιβάλλον.
4. Σχετικά υψηλή θερμογόνος δύναμη.
5. Αναμειγνύεται εύκολα με τον αέρα και δεν απαιτείται διάταξη διασκορπισμού.
6. Είναι σχετικά φθηνό καύσιμο.

7. Δεν περιέχει θείο το οποίο είναι ρυπογόνος ουσία και ισχυρό διαβρωτικό αν μετατραπεί σε θειικό οξύ  $H_2SO_4$ .

Λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, το φυσικό αέριο δεν μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί εύκολα με οχήματα. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι που εφαρμόζονται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου:

- **Μεταφορά με αγωγούς.** Ενδείκνυται για αποστάσεις της τάξεως των 4000 km στη στεριά και της μισής απόστασης υποθαλάσσια.
- **Υγροποιημένο φυσικό αέριο.** Το αέριο υγροποιείται σε ειδικές μονάδες και μεταφέρεται με πλοία στους τερματικούς σταθμούς. Εκεί επαναεριοποιείται και είναι έτοιμο να διανεμηθεί στο δίκτυο.
- **Συμπιεσμένο φυσικό αέριο.** Μια τεχνολογία πιο διαδεδομένη για μικρού μεγέθους μονάδες καθώς ο εξοπλισμός συμπίεσης-εκτόνωσης κοστίζει πολύ λιγότερο από αυτόν της υγροποίησης. Το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε υψηλή πίεση, άνω των 200 bar.

Τα μεγαλύτερα αποθέματα φυσικού αερίου έχουν βρεθεί στη Ρωσία, η οποία είναι και ο μεγαλύτερος εξαγωγέας παγκοσμίως. Η Ρωσία και οι Αλγερία είναι αυτή τη στιγμή οι δύο κύριοι προμηθευτές της Ευρώπης σε φυσικό αέριο. Τελευταίες έρευνες στο οικοπέδο 12 στη θαλάσσια περιοχή νότια της Κύπρου ανακάλυψαν τεράστια κοιτάσματα φυσικού αερίου άριστης ποιότητας. Το απόθεμα ανέρχεται στα 7 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια και ενδέχεται νέες έρευνες να αποκαλύψουν επιπλέον κοιτάσματα. Μέχρι το 2016 αναμένεται η πλήρης λειτουργία του σταθμού εξόρυξης.

## 2.3 ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

### 2.3.1 Γενικά

Τα υγρά καύσιμα παράγονται μέσω της κλασματικής απόσταξης αργού πετρελαίου. Οι πιο εμπορικές μορφές είναι το μαζούτ(HFO) και το πετρέλαιο Diesel. Τα αέρια της καύσης περιέχουν συνήθως άκαυστες ουσίες που είτε εναποτίθενται στις επιφάνειες των εναλλακτών θερμότητας, είτε απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή αιθάλης.

Τα υγρά καύσιμα παρουσιάζουν περισσότερες δυσκολίες στη διαχείρισή τους από τα αέρια. Απαιτείται αποθήκευσή τους σε κατάλληλες δεξαμενές, άντληση τους στο σημείο χρήσης και αρκετές φορές χρειάζονται προθέρμανση.

### Ιδιότητες υγρών καυσίμων

- Θερμογόνος δύναμη. Είναι το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου και αποτελεί βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης της εγκατάστασης.
- Περιεκτικότητα σε θείο. Το θείο κατά την καύση μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου και τριοξείδιο του θείου που είναι διαβρωτικά και όξινα. Επίσης για τη μείωση όξινων καυσαερίων, τα καυσαέρια αποβάλλονται σε υψηλή θερμοκρασία στο περιβάλλον μειώνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης.
- Σημείο ανάφλεξης. Είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία που μπορεί να αναφλεγεί το καύσιμο όταν θερμαίνεται κάτω από πρότυπες συνθήκες. Το σημείο ανάφλεξης αποτελεί βασική προδιαγραφή για τη μεταφορά και αποθήκευση του καυσίμου.
- Τέφρα. Τα υγρά καύσιμα περιέχουν μικρές ποσότητες υλικών που κατά την καύση μετατρέπονται σε τέφρα. Η τέφρα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο σύστημα ψεκασμού. Επίσης, επικάθεται στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας και έτσι μειώνει το βαθμό απόδοσης του συστήματος.

### **2.3.2 Πετρέλαιο Diesel**

Πήρε το όνομα του από τον εμπνευστή των μηχανών Diesel, Rudolf Diesel και το οφείλει στο ότι για αρκετό καιρό ήταν το μόνο καύσιμο που χρησιμοποιούσαν οι μηχανές αυτές. Αυτό γιατί:

- Έχει χαμηλό ιξώδες που επιτρέπει καλύτερο διασκορπισμό.
- Η υψηλή του καθαρότητα εξασφαλίζει καύση δίχως επιβλαβή κατάλοιπα.
- Έχει ευκολία προσαρμογής της καύσης στις απαιτήσεις του φορτίου, όπου απαιτείται γρήγορη αυξομείωση της ισχύος.

Η κύρια διαφορά του Diesel από τις άλλες κατηγορίες πετρελαίου που χρησιμοποιούν οι μηχανές Diesel είναι πως αποτελεί το απόσταγμα του φυσικού πετρελαίου, εξ ου και κατατάσσεται στα πιο ποιοτικά και ακριβά καύσιμα MEK. Χρησιμοποιείται λοιπόν σε ειδικές περιπτώσεις στις οποίες τα βαρέα καύσιμα (π.χ. μαζούτ) δεν ανταποκρίνονται, όπως:

1. Μεγάλες ταχύτητες περιστροφής
2. Μικρή ισχύς μηχανών

Η θερμογόνος του δύναμη είναι πολύ υψηλή και ανέρχεται στις 43 MJ/kg. Στους ρύπους ενός κινητήρα Diesel θα συναντήσουμε μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του θείου και αιθάλη. Το κύριο πρόβλημα παρουσιάζεται στην αιθάλη λόγω του 3,4-βενζο-πυρεναιίου που είναι καρκινογόνο. Διάφορες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για την καύση της αιθάλης μέσα στη μηχανή όπως η καλή έκχυση του καυσίμου στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και ο καλύτερος στροβιλισμός του καυσίμου. Ένας ακόμη τρόπος απομάκρυνσης της αιθάλης είναι η τοποθέτηση κεραμικών φίλτρων αιθάλης στον αγωγό καυσαερίων.

Οι προδιαγραφές του πετρελαίου Diesel για να λειτουργήσει σωστά μια πετρελαιομηχανή ορίζονται από το πρότυπο ISO 8217.

ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ		ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΚΙΝΗΤΗΣ AUTOMOTIVE GAS- OIL	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ HEATING GAS-OIL	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΝΑΥΤΙΑΣ BUNKERING GAS-OIL
	ASTM/IP	ISO-EN			
ΦΕΚ			410B/11-4-2001 332 B/11-2-04	496 B/7-7-93 944 B/11-12-94, 570 B/16-7-96, 1273 B/5-9-03, 1531 B/16-10-03	ISO 8217/96
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	D-1298 D-4052	EN ISO 12185 EN ISO 3675:1998	820-845	to be reported	890 max
ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ, min. °C	D-93	EN 2719	55	55	60
CIPP, °C 1/10-31/3 max. 1/04-30/9 max.	D-309	EN 116	-5 +5	-5 -	-
NEFO, mg/kg max. NEFO ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΜΑ, %v/v max.	D-1744 D-1798	prEN ISO 12937:1998 -	200 -	- 0.10	-
ΛΙΠΩ. ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ, mg/kg max.	-	EN 12662	24	-	-
ΑΝΘΡΥΠΟΛΕΙΜΜΑ, %m/m	D-139 D-4530	EN ISO 10370	0.30 (b)	0.30 (b)	0.30 (b)
ΑΠΟΣΤΑΣΗ 150 °C, °C %v/v ΑΠΟΣΤΑΣΗ 350 °C, max. %v/v			85 85	- 85	- -
ΑΠΟΣΤΑΣΗ 95 (v/v), °C max.	D-86	prEN ISO 3405:1998	360		
ΙΣΩΣΕΣ 40 °C, cSt ή mm <sup>2</sup> /s ΟΕΙΟ, mg/kg max.	D-445 D-4294	EN ISO 3104 EN ISO 14598:1998 EN ISO 8754:1995	2.00-4.50 10	6 1000	1.5 - 6.0 10000
ΔΙΑΒΡ. ΧΑΛ. ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ, min	D-130 D-813	EN ISO 2160 EN ISO 5165:1998	ΚΛΑΣΗ 1 31	ΚΛΑΣΗ 3 -	40 -
ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ, min	D-4737	EN ISO 4264	46	40	-
ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΟΞΕΙΔΩΣΗ, max. g/g m <sup>3</sup>	D-2274	EN ISO 12203	25		
ΣΗΜ. ΡΟΗΣ, (°C) 1/10 - 31/3 max. ΣΗΜ. ΡΟΗΣ, (°C) 1/4 - 30/9 max.	D-5950 D-97	ISO 3016	- -	-9 0	-8 0
ΧΡΩΜΑ YELLOW SOLVENT 124, mg/l max.	D-1500	ΦΕΚ 1273 B/2003	ΑΧΥΡΟΚΙΠΡΕΝΟ	ΕΡΥΘΡΟ 6	ΜΑΥΡΟ
ΤΕΦΡΑ, % m/m max.	D-482	EN ISO 6243	0.01	0.02	0.01
ΚΙΝΙΖΑΡΙΝΗ, mg/l	IP-298/92				3
ΠΟΛΥΚΥΚΛΑ ΑΡΩΜ. ΥΔΡΚΕΣ, %m/m	IP-391/95		11		
ΛΙΠΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ διορθ. διορ. σθθρας σφαιρικού (mDI 4) 60 °C, max.		ISO 12156-1	460		

Πίνακας 2.2 : Πρότυπο ISO 8217 για καύση πετρελαίου diesel

Ο δείκτης κετανίου είναι η σημαντικότερη ιδιότητα του πετρελαίου Diesel. Χαρακτηρίζει την ετοιμότητα του καυσίμου να αναφλεγεί όταν ψεκάζεται στον κινητήρα. Όσο πιο υψηλός είναι ο δείκτης, τόσο πιο εύκολα αναφλέγεται το καύσιμο. Ο δείκτης κετανίου αποτελεί μείζων παράγοντα στον περιορισμό των ρύπων.

### 2.3.3 Μαζούτ

Είναι το μέρος του αργού πετρελαίου που εξέρχεται στη βάση του πύργου απόσταξης του διυλιστηρίου και αποτελεί υπόλειμμα απόσταξης. Έχει σχετικά υψηλή θερμογόνο δύναμη 40 MJ/kg. Οι κυρίαρχοι τύποι μαζούτ είναι δύο, το Νο.1 (χαμηλού ιξώδους) και το Νο.3 (υψηλού ιξώδους). Και οι δύο διατίθενται στην αγορά με χαμηλή ή με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Είναι από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα καύσιμα και αυτό για τρεις λόγους:

- Είναι φθηνό (περίπου το 1/2 της τιμής του Diesel).
- Αποτελεί σχεδόν το 50% του φυσικού πετρελαίου.
- Έχει μεγάλη εφαρμογή σε πολλές πετρελαιομηχανές(πλοία, βιομηχανία) και λέβητες.

Η μορφή του μαζούτ είναι ένα μαύρο παχύρευστο υγρό σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος γι' αυτό απαιτείται προθέρμανσή του (15-45 °C) για τη ροή του στα δίκτυα σωληνώσεων.

Έχει βρει μεγάλη εφαρμογή στους λέβητες των ατμομηχανών εκτοπίζοντας τους γαιάνθρακες. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα το μαζούτ είναι χαμηλότερης ποιότητας από το Diesel σε όλο το φάσμα των φυσικο-χημικών ιδιοτήτων του, με συνέπεια να απαιτούνται ενέργειες κατασκευαστικές αλλά και λειτουργικές για την αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Οι σύγχρονες μεγάλες πετρελαιομηχανές που χρησιμοποιούν μαζούτ είναι βραδύστροφες με μεγάλη ισχύ. Έχουν εξοπλιστεί με συστήματα επεξεργασίας και καθαρισμού των καυσίμων για τον περιορισμό των ανεπιθύμητων προβλημάτων. Επίσης, η τοποθέτηση φίλτρων και η προθέρμανση του καυσίμου για βελτίωση του ιξώδους βελτιστοποιούν τη λειτουργία των μηχανών.



ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ		ΜΑΖΟΥΤ ΧΑΜΗΛΟΥ ΘΕΙΟΥ		ΜΑΖΟΥΤ ΥΨΗΛΟΥ ΘΕΙΟΥ	
	ASTM/IP	ISO/EN	No 1	No3	No 1	No3
ΦΕΚ			320B/26-4-94 887B/19-9-96		320B/26-4-94, 887B/19-9-96, 222B/6-3-01	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ 15, °C kg/m <sup>3</sup> , max	D-1298	EN ISO 3675:1998	970	980	991	995
ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ, °C, min	D-93	EN 22719	66	66	66	66
ΘΕΙΟ, % m/m, max	D-4294	EN ISO 14596:1998 EN ISO 8754:1995 EN 24260:1994	0.7	0.7	3.0	3.0
ΨΩΔΕΣ στους 50 °C cst Ελάχ. (min) Μέγ. (max)	D-445	EN ISO 3104	- 180	181 380	- 180	181 380
ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ, °C, max - από 1/10 έως 15/5 - από 16/5 έως 30/9	D-97	ISO 3016	10 15	- -	10 15	30 30
NEPO % m/m, max	D-95	ISO 3733	0.5	0.5	0.5	0.5
ΟΛΙΚΟ ΙΖΗΜΑ, % m/m, max	D-4870 IP375	-	0.15	0.15	0.15	0.15
ΑΝΟΡΑΚΟΥΧΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑ, (%m/m), max	D-189	EN ISO 10370	15	15	15	17
ΤΕΦΡΑ, %m/m, min	D-482	EN ISO 6245	0.10	0.10	0.10	0.15
ΒΑΝΑΔΙΟ, ppm, min	IP-288		120	150	220	250
ΝΑΤΡΙΟ, ppm, max	IP-288		100	100	100	150
ΚΑΤΩΤΕΡΑ ΘΕΡΜΟΤΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ, Kcal/kg	D-4868		ΝΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ		ΝΑ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ	

No 1: Ξόδες στους 50 οC: 180 cst max  
No 3: Ξόδες στους 50 οC: 380 cst max

**Πίνακας 2.3 : Πρότυπο ISO 8217 για καύση μαζούτ**

Στον Πίνακα 2.3 παρατηρούμε πως η υψηλή συγκέντρωση σε θείο αυξάνει ραγδαία τη συγκέντρωση διοξειδίου του θείου στα καυσαέρια.

## 2.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

Από τον Πίνακα 2.4 συμπεραίνουμε πως το φυσικό αέριο είναι η καθαρότερη ορυκτή πηγή πρωτογενούς ενέργειας. Τα μεγέθη των εκπεμπόμενων ρύπων είναι σαφώς χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του μαζούτ και του πετρελαίου Diesel. Χαρακτηριστικό είναι το μηδενικό ποσοστό σε SO<sub>2</sub> καθώς και η ελάχιστη ποσότητα σωματιδίων. Η έλλειψη σωματιδίων καθιστά ικανό το καύσιμο για χρήση σε μηχανές εξωτερικής καύσης (π.χ. αεριοστρόβιλος) εφόσον δεν επικάθεται στα περύγια.

Τύπος καυσίμου	Διοξείδιο του Άνθρακα	Διοξείδιο του Θείου	Μονοξείδιο του Άνθρακα	Μονοξείδιο του Αζώτου	Υδρογονάνθρακες	Σωματίδια
Μαζούτ χαμηλού θείου	260	1,147	0,046	0,0439	0,015	0,150
Πετρέλαιο θέρμανσης	249	0,056	0,045	0,189	0,015	0,023

Πετρέλαιο κίνησης	244	0,054	0,044	0,185	0,015	0,022
Υγραέριο	227	0,000	0,025	0,157	0,006	0,007
Φυσικό Αέριο	177	0,000	0,022	0,137	0,005	0,007

*Πίνακας 2.4 : Εκπομπές ρύπων ανά καύσιμο*

\*Οι τιμές του πίνακα είναι σε g/KWh.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τομέας της ηλεκτροπαραγωγής είναι ζωτικής σημασίας για κάθε κοινωνία από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Πλήθος τεχνολογιών έχει αναπτυχθεί είτε σε επίπεδο εξέλιξης μιας ήδη υπάρχουσας είτε ως καινοτόμες λύσεις. Έτσι, οι πρώτοι εμβολοφόροι ατμοκινητήρες του 1900 έδωσαν τη θέση τους στους πυρηνικούς αντιδραστήρες του σήμερα. Οι πρόσθετες ανάγκες για ενέργεια ώθησαν την επιστήμη στην αξιοποίηση πάσας πηγής ενέργειας στη φύση. Συνεχώς αναπτύσσονται τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής, αιολικής, δυναμικής ενέργειας του νερού, ενέργειας των κυμάτων κ.α.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα δοθεί έμφαση και εκτενής ανάλυση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) και με συνδυασμένο κύκλο Joule-Rankine, που αφορούν και το περιεχόμενο της οικονομοτεχνικής ανάλυσης που θα ακολουθήσει.

### **3.2 ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΜΕΚ)**

Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με ΜΕΚ βασίζονται στην αρχή λειτουργίας της μηχανής Diesel, η οποία μέσω των παραγώγων της καύσης αποδίδει μηχανικό έργο. Ο άξονας της μηχανής οδηγεί γεννήτρια και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η κύρια εφαρμογή των σταθμών παραγωγής με ΜΕΚ βρίσκεται σε περιοχή όπου η

παροχή άνθρακα και νερού είναι περιορισμένη και η ενεργειακή ζήτηση είναι μικρή. Αυτό παρατηρείται διότι ενώ οι ΜΕΚ αποδίδουν μεγάλη θερμική απόδοση (>50%), η τιμή του καυσίμου είναι πολύ υψηλή σε σχέση με άλλα (φυσικό αέριο, άνθρακας).

Οι ΜΕΚ διακρίνονται βάσει διαφόρων χαρακτηριστικών:

### 1. Βάσει ταχύτητας

Τύπος	Ταχύτητα (RPM)	Ισχύς (KW)	Εφαρμογές
Ταχύστροφος	1200-3600	75-1500	Αυτοκίνητα
Μεσόστροφος	500-1200	500-15000	Παραγωγή ενέργειας Πλοία-Τρένα
Βραδύστροφος	100-180	2000-40000	Παραγωγή ενέργειας- Πλοία

*Πίνακας 3.1: Κατηγοριοποίηση ΜΕΚ βάσει ταχύτητας*

### 2. Βάσει αριθμού χρόνων

- 2-χρονες μηχανές (Παραγωγή ενέργειας-Πλοία)
- 4-χρονες μηχανές (Παραγωγή ενέργειας-Αυτοκίνητα)

### 3. Βάσει καυσίμου

- Diesel
- Μαζούτ (HFO)
- Φυσικό αέριο (NG)
- Dual –fuel (NG/Diesel)
- Multi-fuel (NG/Diesel/HFO)

### 4. Βάσει κύκλου λειτουργίας

- Κύκλος Otto

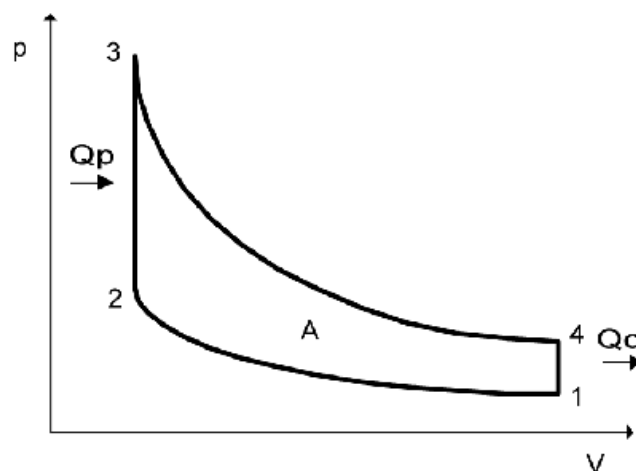
- Κύκλος Diesel

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 70' οι μεσόστροφες 4-χρονης μηχανές κυριαρχούσαν στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό γιατί η τιμή του πετρελαίου ήταν μικρή λόγω της αφθονίας του. Έτσι η παράμετρος απόδοση είχε αποκτήσει λιγότερη σημασία. Μετά τις πετρελαϊκές κρίσεις όμως, οι βραδύστροφοι 2-χρονοι κινητήρες κέρδισαν έδαφος ανταγωνιζόμενοι τους 4-χρονους. Η μεγάλη απόδοση (48-52%) και το μεγάλο εύρος ισχύος (10-50 MW) τους ανέδειξαν σε καλή επιλογή για εφαρμογές υψηλής ισχύος.

### 3.2.1 Κύκλος Otto

Οι μηχανές που προσομοιώνουν τον κύκλο του Otto είναι κυρίως οι βενζινοκινητήρες και οι μηχανές αερίου. Ο κύκλος Otto αποτελείται από τα εξής 4 στάδια :

- 1-2. Ισεντροπική συμπίεση
- 2-3. Προσαγωγή θερμότητας με σταθερό όγκο
- 3-4. Ισεντροπική εκτόνωση
- 4-1. Αποβολή θερμότητας με σταθερό όγκο



Σχήμα 3.1 : Διάγραμμα P-V κύκλου Otto

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Otto με τέλειο αέριο ως ενεργειακό ρευστό είναι :

$$h = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

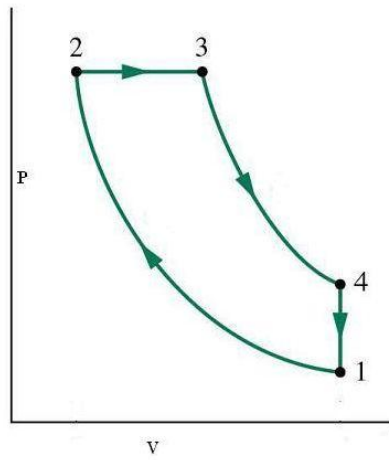
### 3.2.2 Κύκλος Diesel

Ο κύκλος Diesel, γνωστός και ως κύκλος σταθερής πίεσης (λόγω της σταθερής πίεσης της προσδιδόμενης θερμότητας) είναι ένας ιδανικός κύκλος αέρα που εφαρμόζεται σε μηχανές με καύσιμο βαριά κλάσματα πετρελαίου (μαζούτ, diesel κ.α.) και αποτελείται από τα εξής 4 στάδια :

- 1-2. Ισεντροπική συμπίεση με κατανάλωση έργου
- 2-3. Προσαγωγή θερμότητας με σταθερή πίεση
- 3-4. Ισεντροπική εκτόνωση με παραγωγή έργου
- 4-1. Αποβολή θερμότητας με σταθερό όγκο

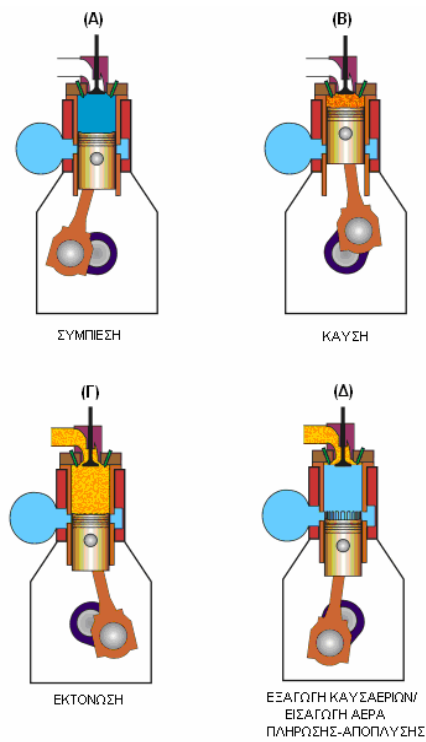
Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Diesel με τέλειο αέριο ως ενεργειακό ρευστό είναι:

$$h = 1 - \frac{T_4 - T_1}{g \cdot (T_3 - T_2)} \quad , \text{ όπου } g \text{ συντελεστής αδιαβατικής μεταβολής.}$$



Σχήμα 3.2 : Διάγραμμα P-V κύκλου Diesel

### 3.2.3 Αρχή λειτουργίας 2-χρονης ΜΕΚ



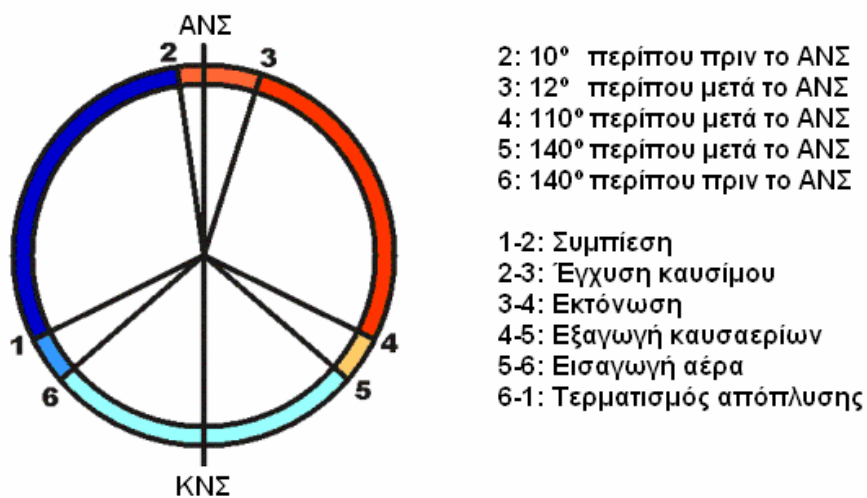
Σχήμα 3.3 : Κύκλος λειτουργίας 2-χρονου κινητήρα

(Α) Συμπύεση, εισάγεται αέρας στον κύλινδρο από τις θυρίδες αέρα εισαγωγής. Ο στροφαλοφόρος άξονας περιστρέφεται δεξιόστροφα και το έμβολο ακολουθεί ανοδική πορεία μέσα στον κύλινδρο. Λόγω αυτού, η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής αυξάνεται. Όταν το έμβολο έχει φτάσει στο ανώτερο σημείο της πορείας του, άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ), τότε η πίεση έχει φτάσει τη μέγιστη τιμή της και η θερμοκρασία ξεπερνά τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου.

(Β) Καύση, λίγο πριν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ γίνεται εισαγωγή του καυσίμου στον κύλινδρο μέσω του εγχυτήρα. Το καύσιμο ψεκάζεται με τη μορφή σταγονιδίων έτσι ώστε να θερμανθεί γρηγορότερα από τον θερμό αέρα. Επίσης, ο ψεκασμός διευκολύνει τον διασκορπισμό του καυσίμου σε όλο το θάλαμο καύσης και την ανάμιξή του με τον αέρα. Όταν οι θερμοδυναμικές συνθήκες επιτευχθούν λαμβάνει χώρα η καύση, αυξάνεται η πίεση και αποδίδεται στο έμβολο ως έργο.

(Γ) Εκτόνωση, είναι η φάση παραγωγής έργου από τον κινητήρα. Περίπου στις 110° από το ΑΝΣ το έμβολο αποκαλύπτει τις θυρίδες καυσαερίων και αρχίζει η ροή καυσαερίων από τον κύλινδρο στον οχετό εξαγωγής.

(Δ) Εξαγωγή καυσαερίων/Εισαγωγή αέρα απόπλυσης, μετά την πάροδο 140° από το ΑΝΣ εμφανίζονται οι θύρες εισαγωγής αέρα. Οι θύρες εμφανίζονται αφού έχουν ανοίξει οι θυρίδες καυσαερίων που προαναφέρθηκαν και η πίεση βρίσκεται στα επίπεδα του οχετού εισαγωγής, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή των καυσαερίων. Η διαδικασία αυτή καλείται απόπλυση.



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα διανομής 2-χρονου κινητήρα

### 3.2.4 Αρχή λειτουργίας 4-χρονης MEK

Στους 4-χρονους κινητήρες μία περίοδος λειτουργίας διαρκεί όσο δύο πλήρεις περιστροφές στον στροφαλοφόρου άξονα ( $720^{\circ}$ ). Περιλαμβάνει τέσσερις διαδρομές του εμβόλου εκ των οποίων οι δύο (1<sup>η</sup> και 4<sup>η</sup>) είναι αφιερωμένες στην εναλλαγή των αερίων, η οποία διεξάγεται με άνεση και δεν απαιτείται καμία ειδική μέθοδος απόπλυσης του κυλίνδρου όπως στις 2-χρονες MEK. Οι 4 χρόνοι λειτουργίας της MEK αναλύονται στη συνέχεια:

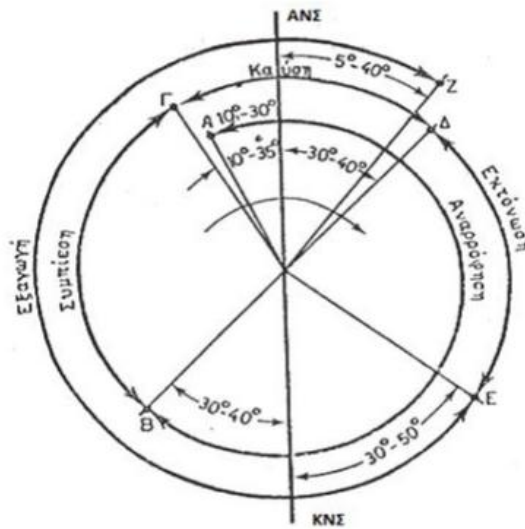
(Α) Αναρρόφηση ή Εισαγωγή, το έμβολο κινείται από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ. Η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοικτή ενώ η βαλβίδα εξαγωγής και ο εγχυτήρας καυσίμου κλειστοί. Η κίνηση του εμβόλου δημιουργεί υποπίεση με αποτέλεσμα την εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο. Όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΚΝΣ η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει. Πρακτικά, το άνοιγμα/κλείσιμο των βαλβίδων δεν πραγματοποιείται τις οριακές στιγμές που το έμβολο βρίσκεται στα ΑΝΣ και ΚΝΣ. Ουσιαστικά, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει  $10-30^{\circ}$  πριν το ΑΝΣ και κλείνει  $30-40^{\circ}$  μετά το ΚΝΣ.

(Β) Συμπίεση, το έμβολο ακολουθεί την αντίστροφη διαδρομή. Όλες οι βαλβίδες, καθώς και ο εγχυτήρας καυσίμου είναι κλειστές. Όταν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ η πίεση του αέρα είναι μεταξύ 30-40 bar και η θερμοκρασία  $600-700^{\circ}\text{C}$ . Σημειώνουμε πως στους βενζινοκινητήρες αυτό είναι το σημείο του σπινθηρισμού του μίγματος αέρα-καυσίμου.

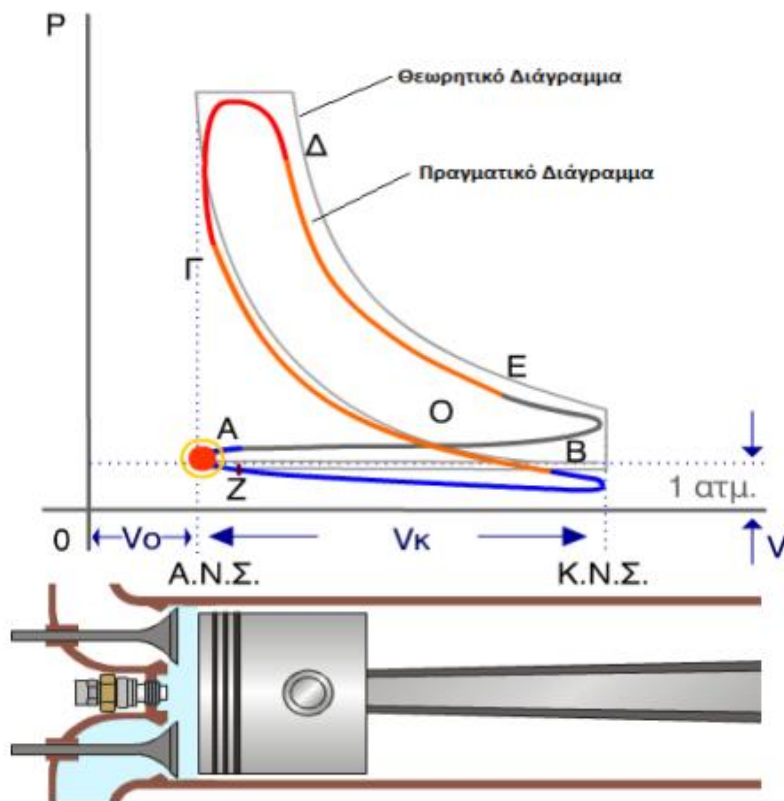
(Γ) Καύση και εκτόνωση, το έμβολο κινείται από το ΑΝΣ στο ΚΝΣ. Στην αρχή αυτού του χρόνου γίνεται έγχυση του πετρελαίου υπό μορφή σταγονιδίων. Τα σταγονίδια αναμειγνύονται με τον αέρα υψηλής πίεσης, η υψηλή θερμοκρασία του οποίου αυταναφλέγει το πετρέλαιο. Η διαδικασία αυτή διαρκεί  $1/10$  του τρίτου χρόνου. Στο υπόλοιπο του χρόνου πραγματοποιείται εκτόνωση και παραγωγή μηχανικού έργου. Όταν το έμβολο φτάσει στο ΚΝΣ η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει. Στην πράξη η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει  $30-50^{\circ}$  πριν το ΚΝΣ και η έγχυση του καυσίμου αρχίζει  $10-35^{\circ}$  πριν το ΑΝΣ και τελειώνει  $30-40^{\circ}$  μετά από αυτό.

(Δ) Εξαγωγή, το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ και τα καυσαέρια απομακρύνονται από τη βαλβίδα εξαγωγής. Όταν το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ ο κινητήρας έχει συμπληρώσει ένα κύκλο λειτουργίας.





Σχήμα 3.5 : Σειρά διεργασιών 4-χρονου κινητήρα



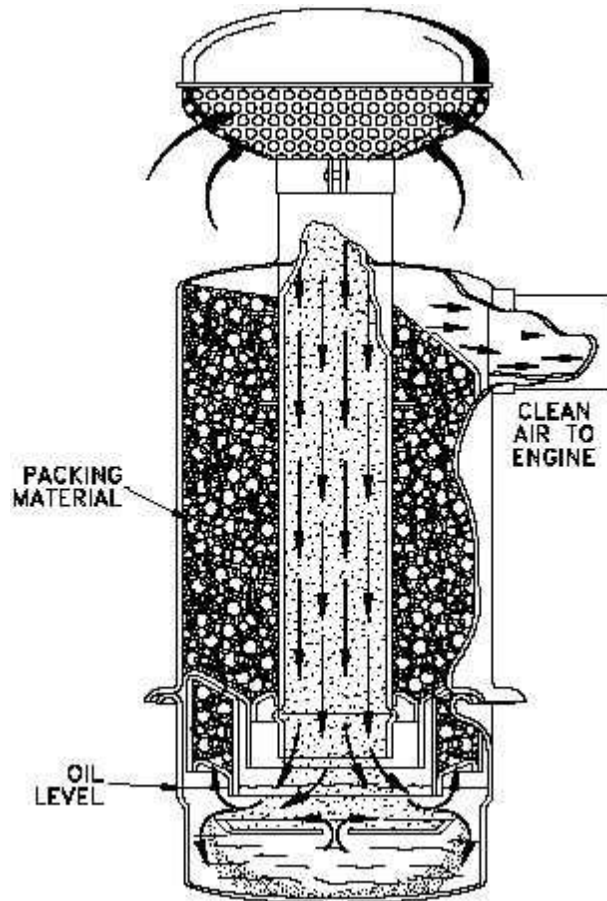
Σχήμα 3.6 : Σύγκριση πραγματικού και θεωρητικού κύκλου 4-χρονης μηχανής

### 3.2.5 Κύρια μέρη εγκατάστασης

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με ΜΕΚ αναλύονται στη συνέχεια.

Σύστημα παροχής καυσίμου. Αποτελείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης, τα φίλτρα, την αντλία μεταφοράς καυσίμου και τη δεξαμενή χρήσης. Το καύσιμο, μόλις παραλαμβάνεται, αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης. Από εκεί αντλείται στην δεξαμενή χρήσης μια φορά την ημέρα ή και συχνότερα. Έπειτα το καύσιμο περνά από τα ειδικά φίλτρα για να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες πριν την έγχυσή του στις μηχανές. Το καθαρό πλέον καύσιμο εισάγεται στις μηχανές με αντλία εισαγωγής καυσίμου.

Σύστημα εισαγωγής αέρα. Παρέχει στις μηχανές τον απαραίτητο για την καύση αέρα. Για να πετύχουν οι μηχανές τον επιθυμητό λόγο συμπίεσης πρέπει ο αέρας που δέχονται να είναι απαλλαγμένος από σωματίδια και δροσερός. Επίσης, οι περισσότερες μηχανές χρησιμοποιούν συμπιεστή και εκεί είναι απαραίτητη η καθαρότητα του αέρα εισαγωγής για να αποφευχθούν φαινόμενα σπηλαίωσης. Τα συστήματα εισαγωγής αέρα χωρίζονται σε δύο τύπους: υγρού και ξηρού. Στα συστήματα υγρού φίλτρου, όπως φαίνεται και στην εικόνα, ο αέρας διέρχεται από λουτρό ελαίου έτσι ώστε να παρακρατηθούν τα σωματίδια. Έπειτα, ο αέρας διέρχεται από δεύτερο φίλτρο ώστε να απαλλαχθεί από το έλαιο.



*Σχήμα 3.7 : Σύστημα εισαγωγής αέρα*

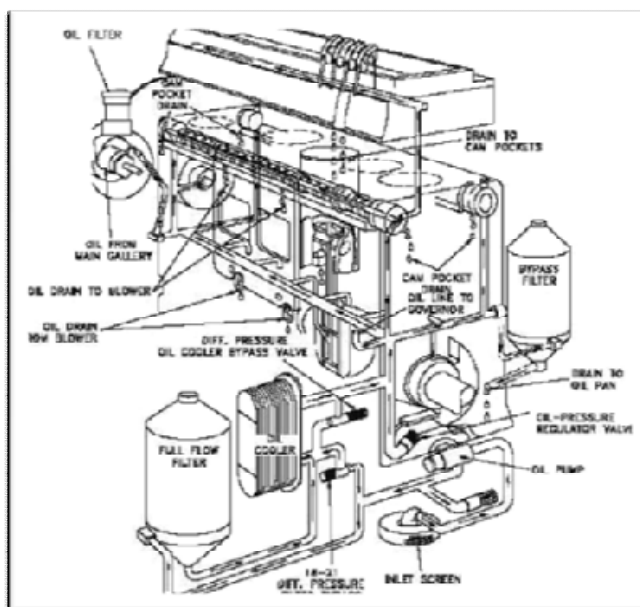
Στα συστήματα ξηρού φίλτρου χρησιμοποιούνται φίλτρα από χαρτί, ύφασμα ή μέταλλο για να καθαρίσουν τον αέρα πριν εισέλθει στη μηχανή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η εισαγωγή του αέρα πρέπει να γίνεται το δυνατό μακρύτερα από την εγκατάσταση των μηχανών. Αυτό γιατί ο αέρας που αποβάλλουν οι μηχανές Diesel είναι θερμός με μικρή πυκνότητα, συνεπώς φτωχός σε οξυγόνο που ευνοεί την καύση.

Σύστημα εξαγωγής καυσαερίων. Είναι το σύστημα που οδηγεί τα καυσαέρια της μηχανής στην ατμόσφαιρα. Συνήθως διαθέτει ενσωματωμένο σιγαστήρα για τη μείωση του θορύβου.

Σύστημα ψύξης. Το ποσό θερμότητας που κατά την καύση δεν μετατρέπεται σε έργο καταπονεί θερμικά τα μεταλλικά μέρη της μηχανής. Για να διατηρηθεί η θερμοκρασία της μηχανής στα ασφαλή όρια λειτουργίας ενεργοποιείται το σύστημα

ψύξης. Το σύστημα ψύξης αποτελείται από τον πύργο ψύξης, μια αντλία και νερό. Το νερό αντλείται από τον πύργο ψύξης και παροχετεύεται στους κυλίνδρους της μηχανής από όπου και απάγει θερμότητα. Μετά επιστρέφει στον πύργο ψύξης, όπου και ψύχεται με χρήση νερού ή αέρα.

Σύστημα λίπανσης. Ελαχιστοποιεί τη φθορά των τριβόμενων μερών τη μηχανής. Αποτελείται από τη δεξαμενή λιπαντικού, αντλία, φίλτρα και ψυγείο λαδιού. Το λιπαντικό αντλείται από τη δεξαμενή και περνά από φίλτρο για να απομακρυνθούν τυχόν ακαθαρσίες. Το καθαρό λιπαντικό διοχετεύεται στα σημεία που απαιτούν λίπανση και οδηγείται στο ψυγείο λαδιού για να επανέλθει σε χαμηλή θερμοκρασία. Η χρήση λαδιού έχει διπλή σημασία, καθώς εκτός ότι λιπαίνει τα μεταλλικά μέρη βοηθά και στην ψύξη τους απορροφώντας μέρος της θερμότητας.



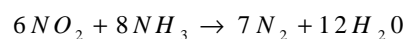
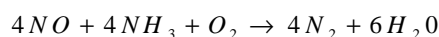
Σχήμα 3.8 : Σύστημα λίπανσης κινητήρα

### 3.2.6 Μείωση εκπομπών NO<sub>x</sub>

Οι τεχνολογίες που αφορούν τη μείωση των εκπομπών μονοξειδίου του αζώτου (NO<sub>x</sub>) από τις ΜΕΚ χωρίζονται σε πρωτογενείς (εντός του θαλάμου καύσης) και δευτερογενείς (επεξεργασία καυσαερίων). Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κατά κόρον δευτερογενείς μέθοδοι και πιο συγκεκριμένα μονάδες καταλυτικής αναγωγής (SCR-Selective Catalytic Reduction). Τα συστήματα αυτά έχουν ιδιαίτερα μεγάλους βαθμούς μετατροπής NO έως και 95%.

Κατά τη μέθοδο SCR γίνεται μίξη των καυσαερίων με υδατικό διάλυμα αμμωνίας ή ουρίας, το οποίο ατμοποιείται και ομογενοποιείται με τα καυσαέρια. Ακολούθως, το

μίγμα ρέει από στρώματα καταλύτη όπου και λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις απονίτρωσης, οι οποίες είναι οι εξής :

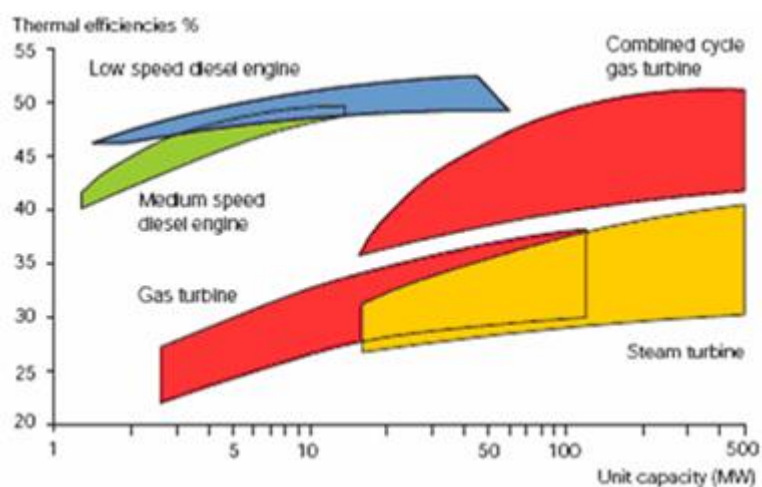


Για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις απαιτείται θερμοκρασία καυσαερίων μεταξύ 300-400 °C. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες έχουμε καύση της αμμωνίας, ενώ σε χαμηλότερες η ταχύτητα αντίδρασης μειώνεται συνεπώς και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος

### 3.2.7 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα ηλεκτροπαραγωγής με ΜΕΚ

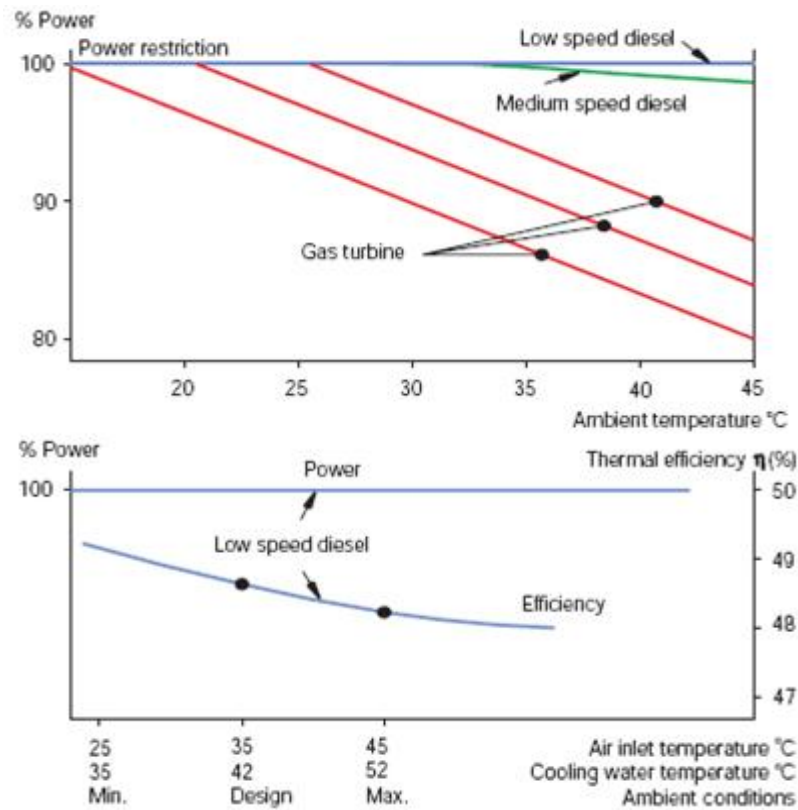
#### Πλεονεκτήματα

- Υψηλός βαθμός απόδοσης. Οι 2-χρονες και οι 4-χρονες ΜΕΚ πλεονεκτούν στην εκμετάλλευση του καυσίμου συγκριτικά, τους ατμοστρόβιλους και τους αεριοστρόβιλους, απλού ή συνδυασμένου κύκλου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



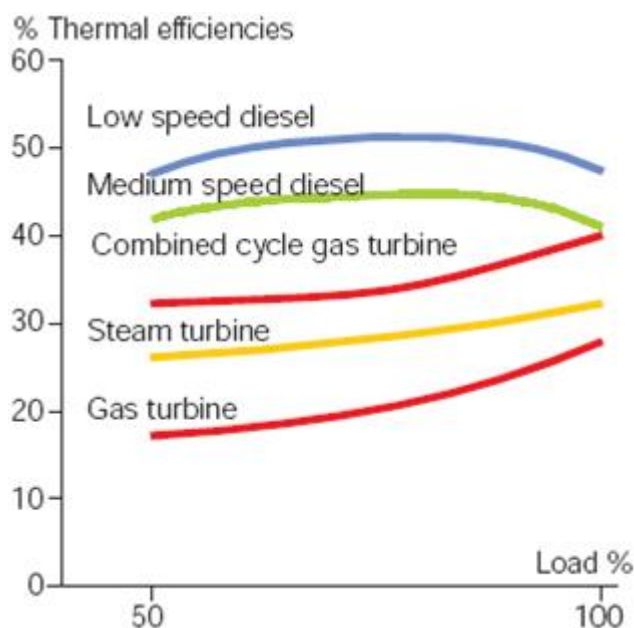
**Σχήμα 3.9 : Σύγκριση θερμικού βαθμού απόδοσης τυπικών μονάδων βάσει του ISO3046/1986**

- Ελάχιστη επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών στη λειτουργία τους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10 η ανοχή των βραδύστροφων και μεσόστροφων ΜΕΚ σε αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας είναι μεγάλη αντίθετα με τις αεριοστροβλικές μονάδες.



**Σχήμα 3.10 : Επίδραση περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ισχύ και την αποδοτικότητα διαφόρων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής**

- Ευελιξία φορτίων. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί η θερμική απόδοση των μηχανών Diesel αλλάζει ελάχιστα στη μεταβολή των φορτίων (+/- 3%).



**Σχήμα 3.11 : Βαθμός απόδοσης διαφόρων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής σε μερικά φορτία**

Η διακύμανση του φορτίου που απαιτείται ρυθμίζεται με τη διαδοχική έναρξη και παύση των μονάδων. Δεδομένου ότι οι ΜΕΚ έχουν γρήγορη απόκριση στις μεταβολές του φορτίου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το δυνατό μεγαλύτερες μονάδες και λίγες στον αριθμό. Γλιτώνουμε έτσι χώρο και χρόνο ανοικοδόμησης και λειτουργικά κόστη, χωρίς να μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος.

- Απλή σχεδίαση και κατασκευή μονάδας.
- Απαιτεί μικρό χώρο.
- Έχει γρήγορη εκκίνηση και μπορεί να λειτουργήσει σε πλήρες φορτίο σε μικρό χρόνο.
- Χρειάζεται σχετικά μικρή ποσότητα νερού για να ψυχθεί.
- Για την ίδια ισχύ το κόστος εγκατάστασης είναι κατά πολύ χαμηλότερο από αυτό μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας.
- Η θερμική απόδοση της μονάδας είναι υψηλότερη της ατμοηλεκτρικής.
- Απαιτεί λιγότερο προσωπικό λειτουργίας.

## Μειονεκτήματα

- Υψηλά έξοδα καυσίμου, ειδικά σε εφαρμογές diesel.
- Η μονάδα δεν μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε κατάσταση υπερφόρτωσης (overload).
- Το κόστος των λιπαντικών είναι σχετικά υψηλό.
- Υψηλά έξοδα συντήρησης.

## **3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ**

### **3.3.1 Γενική περιγραφή**

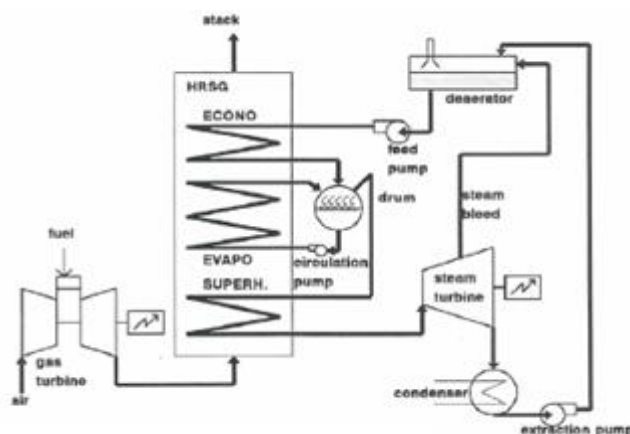
Ο όρος συνδυασμένος κύκλος αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης. Η επιλογή των εργαζόμενων μέσων πρέπει να είναι προσεκτική ώστε να έχουμε ιδανική χρήση της θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία στον κύκλο κορυφής και απόρριψή της στη δυνατό χαμηλότερη θερμοκρασία στον κύκλο βάσης. Ο συνδυασμός που χρησιμοποιείται εκτενέστερα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ανώτερος κύκλος με αέρα και κατώτερος με νερό και ατμό. Η σύνδεση των δύο κύκλων γίνεται με εναλλάκτη θερμότητας. Στο παρελθόν δοκιμάστηκαν αμμωνία και άλλα οργανικά ρευστά στον κατώτερο κύκλο λόγω της δυνατότητας απόρριψης μεγαλύτερων ποσών θερμότητας. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας τα καυσαέρια των αεριοστρόβιλων έχουν πολύ υψηλή θερμοκρασία κάνοντας τον κύκλο νερού-ατμού ανταγωνιστικό απέναντι στο υψηλό κόστος της αμμωνίας.



Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστρόβιλου - ατμοστρόβιλου (κύκλοι Joule – Rankine). Ο αεριοστρόβιλος αναρροφά αέρα, τον συμπιέζει, λαμβάνει χώρα η καύση και έπειτα τα καυσαέρια εκτονώνονται σε στρόβιλο. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εισέρχονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) και παράγεται ατμός. Ο ατμός οδηγείται σε ατμοστρόβιλο για επιπλέον παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια ο ατμός οδηγείται στο συμπυκνωτή και τέλος συμπιέζεται από τις αντλίες για επανατροφοδότηση του κύκλου.

Βέβαια, αυτό είναι το πιο απλό μοντέλο εγκατάστασης. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται διάφορες προσθήκες σε όλα τα κομμάτια του κύκλου. Αναθέρμανση των καυσαερίων και αεριοστρόβιλοι διπλής ατράκτου στον κύκλο Joule-Brayton, καθώς και στρόβιλοι πολλαπλών πιέσεων και αναθερμαντήρες στον κύκλο Rankine είναι μερικές από αυτές και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος συνδυασμένου κύκλου με ανθέρμανση.



**Σχήμα 3.12 :Σχηματικό διάγραμμα συνδυασμένου κύκλου μίας βαθμίδας πίεσης**

Οι σύγχρονες μονάδες συνδυασμένου κύκλου αποτελούνται από αεριοστρόβιλους ισχύος 70-250 MW, λέβητα ανάκτησης θερμότητας και ατμοστρόβιλο δύο ή τριών πιέσεων με αναθέρμανση. Ο αεριοστρόβιλος προσφέρει περίπου τα 2/3 της συνολικής ισχύος της μονάδας. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούν οι αεριοστρόβιλοι είναι φυσικό αέριο ή πετρέλαιο diesel και ο βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να φτάσει το 58%.

Στις ακόλουθες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα τρία βασικά τμήματα μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου: ο αεριοστρόβιλος, ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας και ο ατμοστρόβιλος με όλα τα επιμέρους κομμάτια τους.

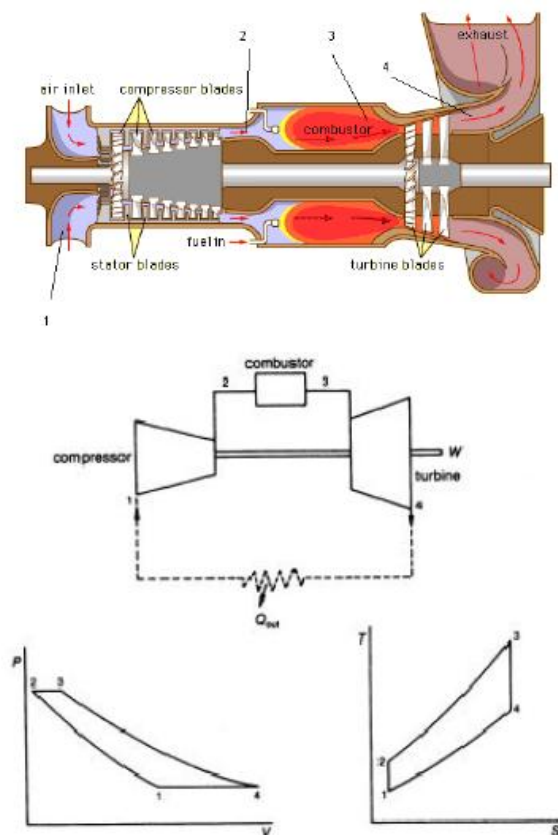
### 3.3.2 Αεριοστρόβιλος

#### 3.3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Ο αεριοστρόβιλος βασίζεται τη λειτουργία του στον θερμοδυναμικό κύκλο Joule-Brayton. Είναι μια θερμική μηχανή που παράγει ισχύ μέσω των δυνάμεων που ασκούνται από αέριο που τον διαρρέει σε πτερύγια στερεωμένα στην άτρακτο. Στις μονάδες συνδυασμένου κύκλου βρίσκουν εφαρμογή οι αεριοστρόβιλοι ανοιχτού τύπου. Αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

- Τον συμπιεστή
- Το θάλαμο καύσης
- Το στρόβιλο

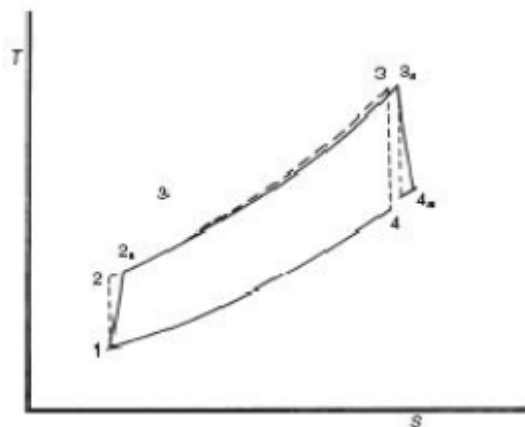
Οι μεταβολές που διεξάγονται στον κύκλο Joule-Brayton αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα P-V και T-S.



Σχήμα 3.13 :Χαρακτηριστικές θέσεις αεριοστρόβιλου και διαγράμματα P-V, T-s κύκλου Joule-Brayton

Ο αέρας από το περιβάλλον αναρροφάται από το συμπιεστή, όπου και αυξάνεται η πίεσή του (1-2) με ταυτόχρονη μείωση όγκου και αύξηση θερμοκρασίας. Έπειτα, οδηγείται στο θάλαμο καύσης, αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται (2-3). Τέλος, τα καυσαέρια οδηγούνται στο στρόβιλο και εκτονώνονται, αποδίδοντας μηχανικό έργο (3-4).

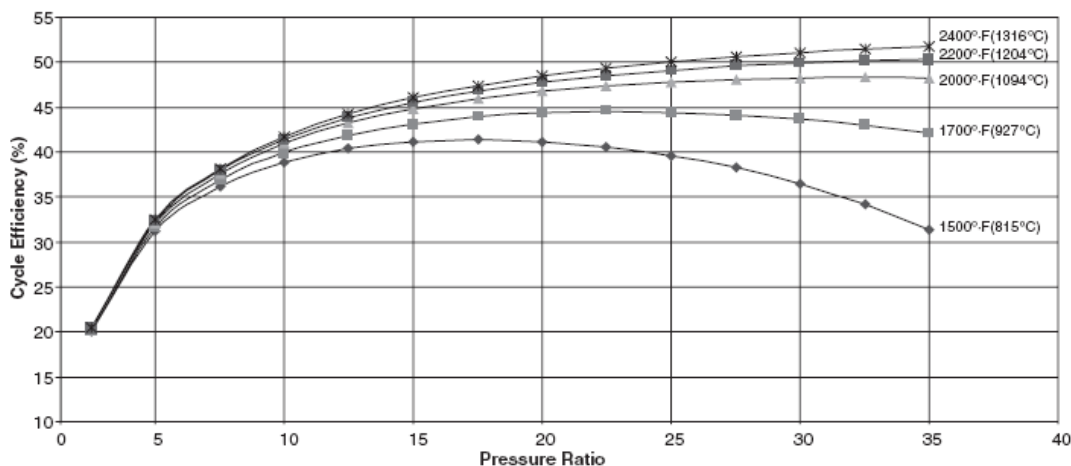
Φυσικά, στον πραγματικό κύκλο συνυπολογίζουμε τις απώλειες και η απόδοση του συστήματος πέφτει. Έτσι, στις περιπτώσεις (1-2) και (3-4) παρατηρούμε αδιαβατική συμπίεση και εκτόνωση αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.14 : Διάγραμμα T-s πραγματικού κύκλου Joule-Brayton**

Ο βαθμός απόδοσης του αεριοστρόβιλου εξαρτάται από τη θερμοκρασία με την οποία εισέρχονται τα καυσαέρια στο στρόβιλο. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται η ισχύς του συστήματος. Βέβαια, η μεγάλη αύξηση στη θερμοκρασία δεν είναι επιθυμητή, λόγω των θερμικών καταπονήσεων στις οποίες υπόκεινται τα πτερύγια του στροβίλου.

Σχετικά με το λόγο συμπίεσης, έχουν υπολογισθεί οι βέλτιστοι λόγοι συμπίεσης συναρτήσει της θερμοκρασίας εισόδου στροβίλου και βαθμού απόδοσης. Αύξηση του λόγου συμπίεσης έχει σαν συνέπεια πτώση της απόδοσης. Επίσης, μεγάλοι λόγοι συμπίεσης καθιστούν το συμπιεστή ευαίσθητο στις μεταβολές του φορτίου μειώνοντας την ευελιξία της εγκατάστασης. Στον παρακάτω πίνακα, επίσης, παρατηρείται πως αύξηση της θερμοκρασίας του κύκλου μας οδηγεί και σε αύξηση του λόγου συμπίεσης.



**Σχήμα 3.15 : Επίδραση του λόγου πίεσεως και της θερμοκρασίας στην απόδοση**

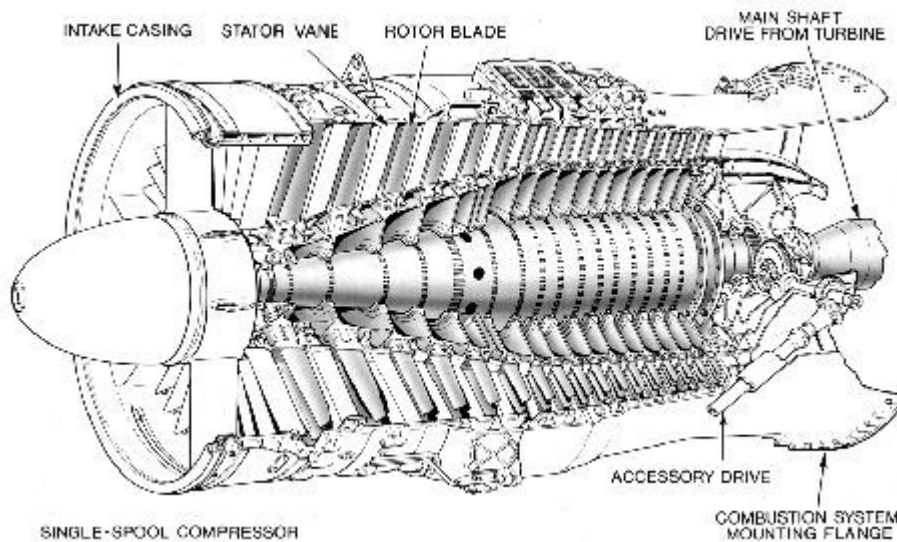
Ο βαθμός απόδοσης των βιομηχανικών αεριοστρόβιλων κυμαίνεται από 28-45%, ανάλογα με την ισχύ. Στις αεροπορικές εφαρμογές οι αποδόσεις είναι μεγαλύτερες.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα τρία βασικά μέρη ενός αεριοστρόβιλου:

### 3.3.2.2 Συμπιεστής

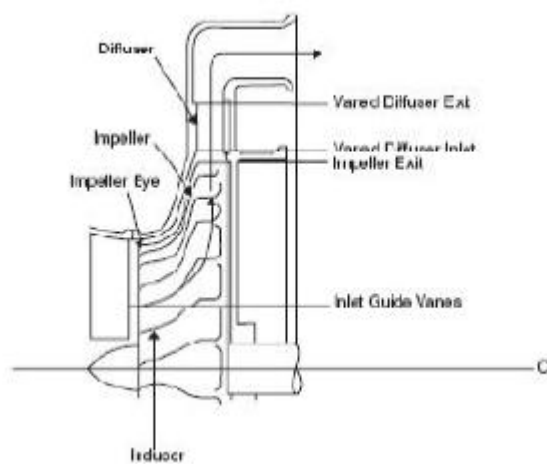
Υπάρχουν δύο κατηγορίες συμπιεστών, οι αξονικοί και οι ακτινικής ροής.

Οι αξονικοί συμπιεστές αποτελούνται από συστοιχίες περιστρεφόμενων πτερυγίων που προοδευτικά συμπιέζουν τη ροή. Η κάθε βαθμίδα επιβραδύνει τη ροή αυξάνοντας έτσι τη στατική πίεση. Η σταδιακή αυτή συμπίεση ελαττώνει κατά πολύ τις απώλειες που θα υπήρχαν αν η συμπίεση γινόταν σε ένα στάδιο. Ο λόγος συμπίεσης που έχει επιτευχθεί σε κάθε βαθμίδα της ροής είναι 1,4 με 1,6. Σε σύγχρονους αξονικούς συμπιεστές συναντάμε στην είσοδό τους μια βαθμίδα σταθερών πτερυγώσεων μεταβλητής γεωμετρίας και πολλές φορές στάτορες μεταβλητής γεωμετρίας σε αρκετές βαθμίδες. Αυτό εξυπηρετεί την καλύτερη λειτουργία του στρόβιλου σε συνθήκες πέρα από του σχεδιασμού καθώς και σε συνθήκες μεταβατικής λειτουργίας (π.χ. εκκίνηση). Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των συμπιεστών αξονικής ροής είναι πως η διατομή τους μειώνεται κατά την κατεύθυνση της ροής. Αυτό αποσκοπεί στη μη μεταβολή της αξονικής ταχύτητας κατά μήκος του συμπιεστή. Επιπλέον, η πυκνότητα του αέρα αυξάνεται λόγω της συμπίεσης, συνεπώς βάσει της αρχής διατήρησης της μάζας η διατομή πρέπει να μικραίνει.



*Σχήμα 3.16 : Αξονικός συμπιεστής*

Οι συμπιεστές ακτινικής ροής αποτελούνται από μια περύγωση (impeller) η οποία περιστρέφεται (ρότορας), αναρροφά αέρα, τον επιταχύνει και μέσω της φυγόκεντρου δύναμης των διοχετεύει στην περίμετρο της περύγωσης. Η περύγωση χωρίζεται σε δύο τμήματα: τον επαγωγό (inducter), που μοιάζει με περύγιο αξονικού συμπιεστή και αλλάζει την πορεία της ροής σε αξονική και το δεύτερο μέρος που επιτελεί την καθαρά ακτινική κίνηση. Περιφερειακά βρίσκεται το κέλυφος του συμπιεστή ή διαχύτης που άλλοτε φέρει περύγωση (στάτορας), άλλοτε όχι. Εκεί μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε στατική πίεση.



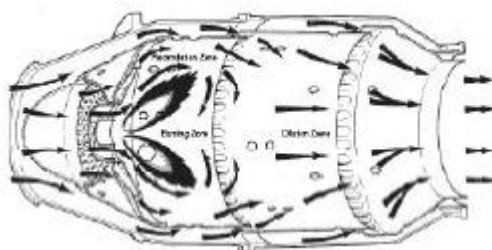
*Σχήμα 3.17 : Ακτινικός συμπιεστής*

Γενικά οι αξονικοί συμπιεστές έχουν καλύτερη απόδοση από τους ακτινικούς αλλά είναι πιο σύνθετοι κατασκευαστικά και συνεπώς ακριβότεροι.

Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές, στην είσοδο των συμπιεστών τοποθετούνται φίλτρα ώστε να συγκρατούν σωματίδια πριν εισέλθουν στο συμπιεστή. Τα σωματίδια αυτά επικάθονται στις πτερυγώσεις και προκαλούν βλάβες στο συμπιεστή. Ακόμη, τοποθετείται σιγαστήρας στην είσοδο του συμπιεστή για τη μείωση του θορύβου. Όλες αυτές οι προσθήκες συντελούν σε μια μικρή πτώση πίεσης στην είσοδο του αεριοστρόβιλου.

### 3.3.2.3 Θάλαμος καύσης

Στο θάλαμο καύσης λαμβάνει χώρα η ανάφλεξη και καύση του μίγματος αέρα-καυσίμου. Πριν την καύση γίνεται η έκχυση του καυσίμου, η πλήρης εξαέρωσή του και η ανάμιξη με τον αέρα. Ο θάλαμος καύσης αποτελείται από όλα τα τμήματα που είναι υπεύθυνα για όλες τις παραπάνω διεργασίες. Η σωστή υλοποίηση των παραπάνω εξασφαλίζει μέγιστη εκμετάλλευση του καυσίμου και σωστή λειτουργία της μηχανής.



*Σχήμα 3.18 : Θάλαμος καύσης αεριοστρόβιλου*

Τα κύρια μέρη ενός θαλάμου καύσης είναι τα εξής:

1. Ο διαχύτης, ο οποίος επιβραδύνει την έξοδο του συμπιεστή.
2. Ο διαχωριστής, ο οποίος διαχωρίζει το ρεύμα αέρα σε κύριο και δευτερεύον.
3. Ο θόλος, που δημιουργεί υψηλή τύρβη για καλύτερη ανάμειξη καυσίμου και αέρα.
4. Ο φλογοσωλήνας, που εμπεριέχει τη φλόγα.
5. Ο εγχυτήρας καυσίμου.
6. Ο αναφλεγκτήρας.

Αξίζει να σημειωθεί πως για τη σωστή λειτουργία του αεριοστρόβιλου πρέπει να διατηρείται ευσταθής φλόγα. Για να συμβεί αυτό μέσα σε συνεχή ροή αέρα θα πρέπει η ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας να ισούται με την ταχύτητα της ροής.

### 3.3.2.4 Στρόβιλος

Ο ρόλος του στροβίλου είναι η απορρόφηση ενέργειας από το εργαζόμενο μέσο την οποία μεταφέρει στον άξονα ως μηχανικό έργο. Ο στρόβιλος εκμεταλλεύεται την υψηλή πίεση και θερμοκρασία των καυσαερίων. Ωστόσο, η έκθεση των πτερυγίων σε υψηλές θερμοκρασίες καταπονεί θερμικά το στρόβιλο, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η εγκατάσταση συστήματος ψύξης. Πολλές φορές η απόδοση ενέργειας στον άξονα του στροβίλου γίνεται σε περισσότερες από μία βαθμίδες (πολυβάθμιος στρόβιλος). Η κάθε βαθμίδα αποτελείται από μία σταθερή και μια κινητή πτερύγωση. Ο σχεδιασμός των πτερυγώσεων αυτών στηρίζεται στην αεροθερμοδυναμική ανάλυση της ροής. Οι βαθμίδες ενός στροβίλου διαχωρίζονται σε βαθμίδες δράσης και βαθμίδες αντίδρασης, βάσει του βαθμού αντίδρασης. Βαθμός αντίδρασης ορίζεται

ως  $r = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3}$  και δηλώνει που γίνεται η μεταβολή της πίεσης.

Αν  $r=0$  η μεταβολή λαμβάνει χώρα στη σταθερή πτερύγωση (στρόβιλος δράσης), αντίθετα έχουμε στρόβιλο αντίδρασης.

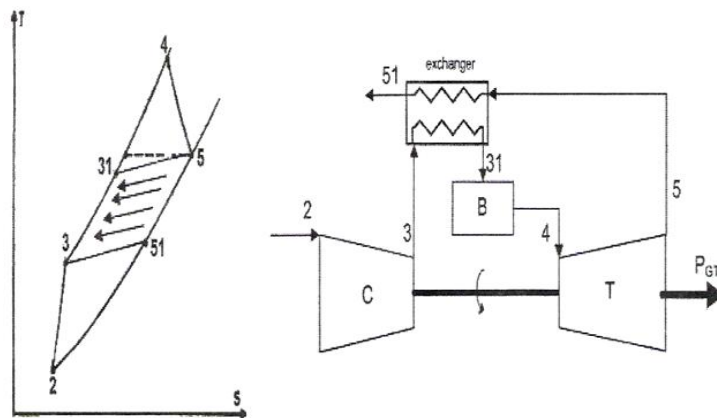
Στην πράξη οι αξονικοί στρόβιλοι είναι κατασκευασμένοι με συνδυασμένες βαθμίδες δράσης-αντίδρασης. Η αναλογία δράσης-αντίδρασης συνίσταται να είναι ισομοιρασμένη, δηλαδή  $r=0,5$ . Αντίθετα με τους αξονικούς συμπιεστές, στους αξονικούς στρόβιλους παρατηρείται αύξηση της διατομής. Αυτό γιατί η μείωση της πυκνότητας συνεπάγεται αύξηση παροχής όγκου.

### 3.3.2.5 Βελτιώσεις κύκλου Joule-Brayton

Το πεδίο στο οποίο υστερούν οι αεριοστρόβιλοι συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής υψηλής ισχύος είναι ο βαθμός απόδοσης. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες που βελτιώνουν το βαθμό απόδοσης των αεριοστροβίλων και θα παρουσιαστούν παρακάτω:

- Ανακόμιση θερμότητας

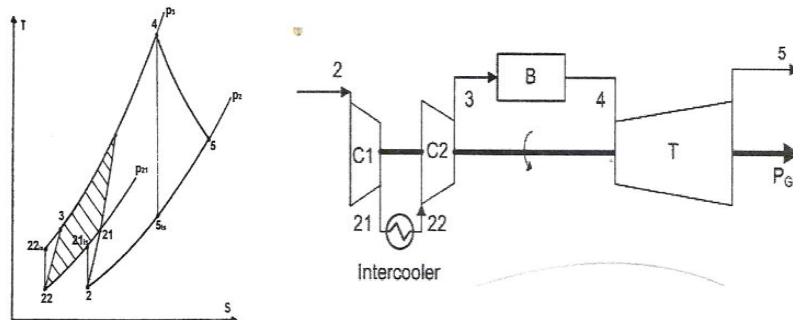
Με κατάλληλες τιμές θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο και λόγου συμπίεσης είναι δυνατό τα καυσαέρια στην έξοδο του στροβίλου να έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από την έξοδο του συμπιεστή. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να μεταφερθεί θερμότητα από τα καυσαέρια στον αέρα εξόδου του συμπιεστή, πριν αυτός εισέλθει στο θάλαμο καύσης. Με αυτό τον τρόπο κερδίζεται θερμότητα που θα έπρεπε να αποδοθεί από το καύσιμο.



**Σχήμα 3.19 : Κύκλος με ανακόμιση θερμότητας**

- Ενδιάμεση ψύξη συμπίεστη

Η ενδιάμεση ψύξη συμπίεστη έχει σκοπό να φτάσει το εργαζόμενο μέσο σε υψηλά πεδία συμπίεσης, χωρίς να αυξάνεται υπερβολικά η θερμοκρασία του.



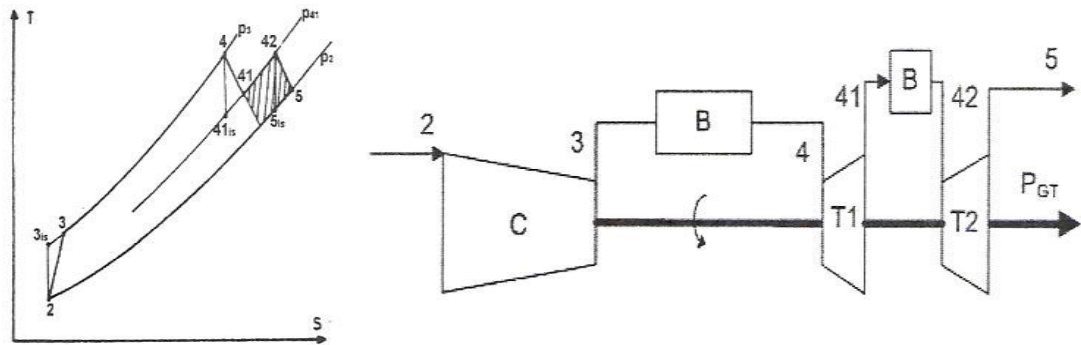
**Σχήμα 3.20 : Κύκλος με ενδιάμεση ψύξη**

Για μικρούς λόγους πίεσης ο βαθμός απόδοσης μειώνεται εφόσον απαιτείται περισσότερη θερμότητα για να αποκτήσει ο αέρας την επιθυμητή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο. Αντίθετα, όταν ο λόγος πίεσης ξεπερνάει το λόγο πίεσης που εμφανίζει το μέγιστο βαθμό απόδοσης, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να παρουσιάσει σημαντική αύξηση.

- Αναθέρμανση

Η ισοθερμοκρασιακή αποτόνωση μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της αναθέρμανσης των καυσαερίων σε ένα δεύτερο θάλαμο καύσης.





**Σχήμα 3.21 : Κύκλος με αναθέρμανση**

Αξίζει να σημειωθεί πως η εφαρμογή της αναθέρμανσης έχει πολλές δυσκολίες, καθώς ο δεύτερος θάλαμος καύσης λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

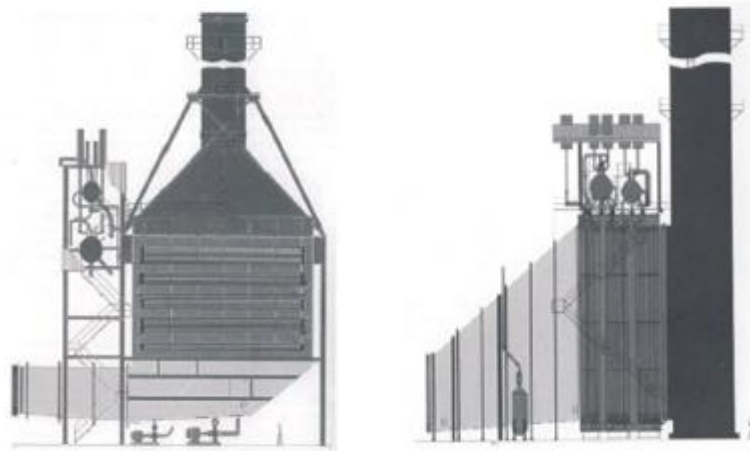
### 3.3.3 Λέβητας ανάκτησης θερμότητας (HRSG)

#### 3.3.3.1 Γενική περιγραφή

Ο λέβητας ανάκτησης θερμότητας (Heat recovery steam generator, HRSG) αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των δύο συνεργαζόμενων κύκλων, Joule και Rankine. Λειτουργεί ως ένας εναλλάκτης θερμότητας καθώς απάγει θερμότητα από τα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου, την οποία προσδίδει στο νερό που πρόκειται να ατμοποιηθεί και να προωθηθεί στον αμμοστρόβιλο. Κατασκευαστικά ο λέβητας πρέπει να έχει γρήγορη απόκριση στις διακυμάνσεις του φορτίου, υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη διαθεσιμότητα.

Με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής τους οι λέβητες ανάκτησης διαχωρίζονται σε κατακόρυφους και οριζόντιους.

- Οι κατακόρυφοι λέβητες ανάκτησης παλαιότερα ήταν γνωστοί ως βεβιασμένης κυκλοφορίας καθώς χρησιμοποιούσαν αντλίες για την κυκλοφορία του νερού στις επιφάνειες συναγωγής. Οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι οριζόντια στη ροή των καυσαερίων. Παρόλα αυτά μια τέτοια μονάδα μπορεί να σχεδιαστεί χωρίς την τοποθέτηση αντλιών, προσαρμόζοντας την κλίση των σωλήνων νερού-ατμού.
- Οι οριζόντιοι λέβητες ανάκτησης είναι γνωστοί ως φυσικής κυκλοφορίας η κυκλοφορία στον ατμοποιητή εξασφαλίζεται από τη διαφορά πυκνότητας νερού και ατμού και τη βαρύτητα. Οι σωληνώσεις είναι κατακόρυφες στη ροή των καυσαερίων.



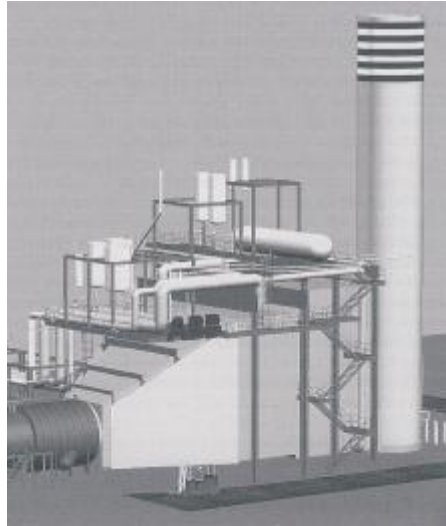
**Σχήμα 3.22 : Κατακόρυφος (αριστερά) και οριζόντιος (δεξιά) λέβητας ανάκτησης θερμότητας**

Στο παρελθόν οι κατακόρυφοι λέβητες έμοιαζαν ιδανική επιλογή για μονάδες συνδυασμένου κύκλου καθώς υπερτερούσαν στα εξής:

1. Απαιτούν λιγότερο χώρο λόγω κατακόρυφης διάταξης
2. Έχουν μικρότερο όγκο λόγω της χρήσης λεπτότερων σωλήνων
3. Παρουσιάζουν μικρότερη συγκέντρωση ατμού στους οικονομητήρες κατά την εκκίνηση.

Με την σύγχρονη, όμως, κατασκευή των οριζόντιων λεβήτων τα μειονεκτήματα σε σχέση με τους κατακόρυφους έχουν εξαιρεθεί. Επιπλέον, η μη χρήση αντλιών είναι σημαντικό προσόν σε εγκαταστάσεις όπου οι πιέσεις ξεπερνούν τα 100 bar, όπου οι αντλίες πρέπει να λειτουργούν και να συντηρούνται με ιδιαίτερο τρόπο.

Οι παραπάνω δύο τύποι χρησιμοποιούν τύμπανο για το διαχωρισμό νερού-ατμού. Μια τέτοια εγκατάσταση όμως, δεν εξυπηρετεί τις συχνές εκκινήσεις και αλλαγές φορτίου και τις υψηλές πιέσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται λέβητας ανάκτησης θερμότητας εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (once through). Σε αυτό τον τύπο ο οικονομητήρας, ο ατμοποιητής και ο υπερθερμαντής είναι ένας ενιαίος σωλήνας. Στη μία άκρη του σωλήνα αυτού εισέρχεται νερό και στην άλλη εξέρχεται υπέρθερμος ατμός. Με αυτό τον τρόπο απαλλασσόμαστε από τη χρήση τυμπάνου και αντλιών, δίνοντας στο σύστημά μας ευελιξία στις εκκινήσεις και στις αλλαγές φορτίου.

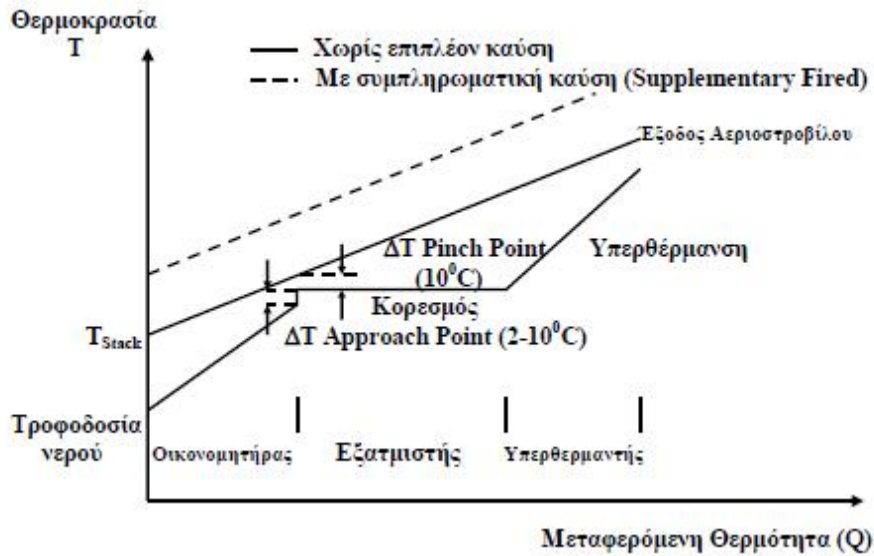


*Σχήμα 3.23 : Λέβητας ανάκτησης θερμότητας εξαναγκασμένης κυκλοφορίας*

Για την καλύτερη μεταφορά θερμότητας από την πλευρά του καυσαερίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες με πτερυγώσεις. Το πλήθος των πτερυγώσεων εξαρτάται από την ποιότητα και το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί ο αεριοστρόβιλος (π.χ. 200-280 πτερύγια για καύσιμο φυσικό αέριο ή πετρέλαιο diesel, 120-160 πτερύγια για βαρύτερα καύσιμα).

Δύο θερμοκρασιακές διαφορές είναι οι σημαντικές παράμετροι στη διαστασιολόγηση ενός λέβητα ανάκτησης.

- Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού μέσα στο τύμπανο και της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον ατμοποιητή (pinch point temperature).
- Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας κορεσμού στο τύμπανο από τη θερμοκρασία εξόδου του νερού από τον οικονομητήρα (approach temperature).



Σχήμα 3.24 : Διάγραμμα μεταφοράς θερμότητας για μονής βαθμίδας πίεσης HRSG

Κατά την κατασκευή του λέβητα επιθυμούμε η pinch point temperature και η approach temperature να είναι όσο το δυνατό μικρότερες, πράγμα που ερμηνεύεται σε μεγαλύτερη παραγωγή ατμού. Ωστόσο, όσο αυτές οι τιμές τείνουν στο μηδέν η επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας τείνει στο άπειρο. Άρα, θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται το μέγιστο θερμικό κέρδος σε συνδυασμό με τον οικονομικότερο όγκο σωληνώσεων.

Όσο το pinch point μειώνεται η επιφάνεια συναλλαγής αυξάνεται εκθετικά και η ατμοπαραγωγή γραμμικά. Σε μονάδες μεγάλης απόδοσης το pinch point έχει τιμή 8-15 K ενώ σε χαμηλότερης απόδοσης 15-25 K.

Η ογκομετρική αλλαγή στον ατμοποιητή είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας. Οι μεγάλες διαφορές ειδικού όγκου ατμού και νερού σε μέσες και χαμηλές πιέσεις οδηγούν σε εκτόπιση μεγάλων ποσοτήτων νερού κατά την εκκίνηση της ατμοποίησης. Αν το τύμπανο δεν μπορεί να διαχειριστεί τις ποσότητες αυτές τότε θα πρέπει σε κάθε εκκίνηση της μονάδας να απομακρύνεται το νερό από το τύμπανο για την αποφυγή της εισόδου νερού στον κύκλο ατμού της εγκατάστασης.

Τέλος, σε περίπτωση λειτουργίας εκτός του σημείου σχεδιασμού μπορεί οι οικονομητήρες να αρχίσουν να παράγουν ατμό, μπλοκάροντας τις σωληνώσεις και μειώνοντας την απόδοσή τους. Για αυτό το λόγο ο οικονομητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε το νερό στην έξοδό του να είναι ελαφρώς υπόψυκτο, αυξάνοντας τη θερμοκρασία προσέγγισης. Αυτή η αύξηση πρέπει να είναι το δυνατό μικρότερη διότι επηρεάζει αρνητικά την ατμοπαραγωγή.

### 3.3.3.2 Λέβητες ανάκτησης θερμότητας με συμπληρωματική καύση

Παρότι οι περισσότεροι λέβητες ανάκτησης σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου δεν χρησιμοποιούν συμπληρωματική καύση, υπάρχουν μερικές περιπτώσεις που βρίσκουν εφαρμογή (π.χ. συμπαραγωγή με παλινδρομικές μηχανές). Οι συνθήκες λειτουργίας ενός λέβητα με καύση και ενός χωρίς είναι πρακτικά οι ίδιες.

Μονάδες που μετά την καύση δεν ξεπερνούν τους 780 °C κατασκευάζονται με χρήση σωληνωτών καυστήρων (duct burners). Οι καυστήρες καίνε φυσικό αέριο που δημιουργεί ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας μετά την καύση. Καυστήρες πετρελαίου δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι λόγω της σύνθετης δομής τους και του αυξημένου κόστους εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας.

Η χρήση συμπληρωματικής καύσης εξασθενεί με το πέρασμα του χρόνου καθώς:

- Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου είναι πλέον πολύ υψηλές, κοντά στα όρια λειτουργίας των HRSG.
- Συμπληρωματική καύση συνεπάγεται μείωση της απόδοσης της μονάδας.

Η συμπληρωματική καύση εφαρμόζεται σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου με συμπαραγωγή θερμότητας, όπου η ποσότητα παραγόμενου ατμού διαχωρίζεται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση η παραγωγή ατμού ρυθμίζεται από τη συμπληρωματική καύση.

### 3.3.3.3 Διάταξη λέβητα ανάκτησης θερμότητας

Η διάταξη του λέβητα ανάκτησης θερμότητας απαρτίζεται από σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας τοποθετημένους σε συστοιχίες. Ο λέβητας μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βασικά μέρη ανάλογα με την αρμοδιότητα του καθενός. Τα καυσαέρια εισέρχονται στον HRSG από τον υπερθερμαντή και εξέρχονται από τον οικονομητήρα. Την αντίθετη πορεία ακολουθεί το νερό-ατμός. Πρέπει να αναφερθεί πως στην πλειονότητα των εγκαταστάσεων υπάρχει προθερμαντής υψηλής πίεσεως, στον οποίο ο αέρας καύσης θερμαίνεται

Οικονομητήρας (Economizer). Αποτελεί το τελευταίο τμήμα του λέβητα και σκοπός του είναι η απορρόφηση μέρους της θερμότητας των καυσαερίων στο τελικό στάδιο πριν αυτά αποβληθούν στην ατμόσφαιρα. Η θερμότητα αυτή παρέχεται στο νερό τροφοδοσίας που έρχεται από τον συμπυκνωτή. Το νερό θερμαίνεται ως τη θερμοκρασία κορεσμού και είναι έτοιμο να τροφοδοτηθεί στον ατμοποιητή.

Ατμοποιητής (Evaporator). Σε αυτό το κομμάτι της εγκατάστασης το κορεσμένο νερό ατμοποιείται και καταλήγει στο τύμπανο. Εκεί γίνεται ο τελικός διαχωρισμός νερού-ατμού. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης δύναται να υπάρχουν τρία τύμπανα, χαμηλής (LP), μεσαίας (IP) και υψηλής πίεσης (HP).

Υπερθερμαντής (Superheater). Έχει σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του κορεσμένου ατμού ώστε να εισέλθει στον αμοστρόβιλο. Οι συστοιχίες των υπερθερμαντών είναι τοποθετημένες πρώτες στη ροή των καυσαερίων αλλά και στο ενδιάμεσο της ροής.

Αξίζει να σημειωθεί πως η πλειονότητα των μονάδων συνδυασμένου κύκλου είναι εξοπλισμένες με αναθερμαντή (Reheater). Ο αναθερμαντήρας ατμού είναι μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας που χρησιμεύει στην αναθέρμανση του ατμού που αποτονώνεται μερικώς στο τμήμα υψηλής πίεσης του αμοστρόβιλου. Η κατασκευή του αναθερμαντή είναι παρόμοια μορφολογικά με αυτή του υπερθερμαντή. Η αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού γίνεται μέχρι να φτάσει τα επίπεδα της εξόδου του υπερθερμαντή και να εισέλθει ξανά στον αμοστρόβιλο.

Τα καυσαέρια που εισέρχονται στο λέβητα ανάκτησης έχουν μέσο όρο θερμοκρασίας 540 °C και εξέρχονται στους 120-260 °C. Ο ατμός που παράγεται έχει πίεση της τάξης των 55 bar και θερμοκρασία 430 °C. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ανάκτηση ενέργειας που γίνεται σε ένα λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς συμπληρωματική καύση.

Ο βαθμός απόδοσης ενός HRSG ορίζεται ως η σχετική διαφορά των καυσαερίων στον υπερθερμαντήρα και στον ατμοποιητή.

$$e_{hrsg} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_3}$$

Όπου:

T<sub>1</sub>= θερμοκρασίας εισόδου καυσαερίων στο λέβητα

T<sub>2</sub>=θερμοκρασία καυσαερίων στον υπερθερμαντήρα

T<sub>3</sub>= θερμοκρασία καυσαερίων στον ατμοποιητή

Η παραγωγή ατμού μπορεί να υπολογισθεί βάσει του παρακάτω τύπου.

$$m_{stm} = \frac{m_{gas} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_3) \cdot E \cdot (1 - L)}{h_{stm1} - h_{liq3}}$$

Όπου:

$m_{stm}$  = Παροχή ατμού σε kg/hour

$m_{gas}$  = Παροχή καυσαερίων από αεριοστρόβιλο σε kg/hour

$C_p$  = Ειδική θερμότητα καυσαερίων σε KJ/kg<sup>0</sup>C

$T_1$  = Θερμοκρασία καυσαερίων κατά την είσοδο στον Λ.Α.Θ.

$T_3$  = Θερμοκρασία κορεσμού του ατμού

$E$  = Βαθμός απόδοσης Λ.Α.Θ. (effectiveness)

$L$  = απώλειες (ακτινοβολία)

$H_{stm1}$  = Ενθαλπία υπέρθερμου ή κορεσμένου ατμού στην σχεδιασμένη πίεση και θερμοκρασία.

$H_{liq3}$  = Ενθαλπία κορεσμένου νερού στη σχεδιασμένη πίεση

### 3.3.4 Ατμοστρόβιλος

Ο ατμοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή υψηλής συγκέντρωσης ισχύος και γρήγορης περιστροφής που απορροφά ενέργεια από τον ατμό και τη μετατρέπει σε μηχανική. Το εύρος ισχύος των ατμοστροβίλων εκτείνεται από λίγα kW έως και 1300 MW σε μια άτρακτο.

#### 3.3.4.1 Κατηγοριοποίηση ατμοστροβίλων

Η κατηγοριοποίηση των αμμοστροβίλων γίνεται βάσει διαφόρων παραγόντων, όπως οι παρακάτω:

### 1. Διάταξη ροής

- i. Απλής ροής, όπου ο ατμός κινείται σε μία κατεύθυνση από την είσοδο ως την έξοδο.
- ii. Διπλής ροής (αντιρροής), όπου ο ατμός χωρίζεται σε δύο ροές και περνά από τις διαφορετικές σειρές βαθμίδων με αντίθετη φορά.
- iii. Σύνθετης διάταξης, όπου ο ατμός περνά από μια σειρά από μονάδες τοποθετημένες σε δύο ή περισσότερα κελύφη πάνω στην ίδια άτρακτο.

### 2. Τύπος πτερυγώσεως

- i. Στρόβιλοι δράσεως.  
Είναι στρόβιλοι με μηδενικό βαθμό αντίδρασης ( $r=0$ ). Η σταθερή πτερύγωση έχει σχεδιασμό ώστε να επιταχύνει τη ροή που προσπίπτει σε αυτόν, μειώνοντας ταυτόχρονα την πίεση. Η εξερχόμενη ροή εισέρχεται στην κινητή πτερύγωση ωθώντας τα πτερύγια. Μεταξύ εισόδου και εξόδου δεν υπάρχει μεταβολή της στατικής πίεσης του ρευστού.
- ii. Στρόβιλοι αντιδράσεως.  
Είναι στρόβιλοι που έχουν κάποιο βαθμό αντίδρασης. Η πίεση τόσο στο ρότορα όσο και στο στάτορα μειώνεται αναλογικά με το βαθμό αντίδρασης. Αν ο βαθμός αντίδρασης είναι 100%, όλη η πτώση πίεσης γίνεται στο ρότορα.
- iii. Συγκριτικός πίνακας.

Στρόβιλος δράσης		Στρόβιλος αντίδρασης	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εκμετάλλευση διατιθέμενης ισεντροπικής πτώσης σε λίγες βαθμίδες	Δαπανηρή κατασκευή διαφραγμάτων	Φθινή κατασκευή	Απαίτηση μικρών αξονικών και ακτινικών διακένων
Ταχεία εκκίνηση στροβίλου	Υψηλός αριθμός στροφών για την επίτευξη καλού βαθμού απόδοσης	Πολύ καλή ροή ατμού	Δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας



Πολύ καλή στεγανότητα στα διαφράγματα		Καλός βαθμός απόδοσης σε χαμηλές στροφές	Μεγάλες απώλειες ατμού στις ακραίες βαθμίδες
			Μεγάλος αριθμός βαθμίδων

*Πίνακας 3.2 : Σύγκριση στροβίλων δράσης και αντίδρασης*

### 3. Πίεση τροφοδοσίας

- i. Χαμηλής πίεσης, για τροφοδοσία μέχρι 20 bar.
- ii. Μεσαίας πίεσης, για τροφοδοσία μέχρι 40 bar.
- iii. Υψηλής πίεσης, για τροφοδοσία μέχρι 170 bar.
- iv. Υπερ-υψηλής πίεσης, για τροφοδοσία πάνω 170 bar.

### 4. Συνθήκες τροφοδοσίας εξόδου

- i. Ατμοστρόβιλοι συμπίκνωσης. Στην έξοδο του στροβίλου έχουμε συμπυκνωτή, όπου ο ατμός υγροποιείται. Η πίεση λειτουργίας είναι πολύ μικρότερη της ατμοσφαιρικής (0,025-0,5 bar).
- ii. Ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης. Στην έξοδο του στροβίλου ο ατμός έχει αρκετά υψηλή πίεση και θερμοκρασία για να τροφοδοτήσει βιομηχανικές διεργασίες ή ακόμα και δεύτερο ατμοστρόβιλο (1-20 bar).
- iii. Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία. Μέρος του ατμού απομαστεύεται σε κάποιο μέσο στάδιο του ατμοστροβίλου για εξωτερικές διεργασίες.

### 5. Ταχύτητα περιστροφής

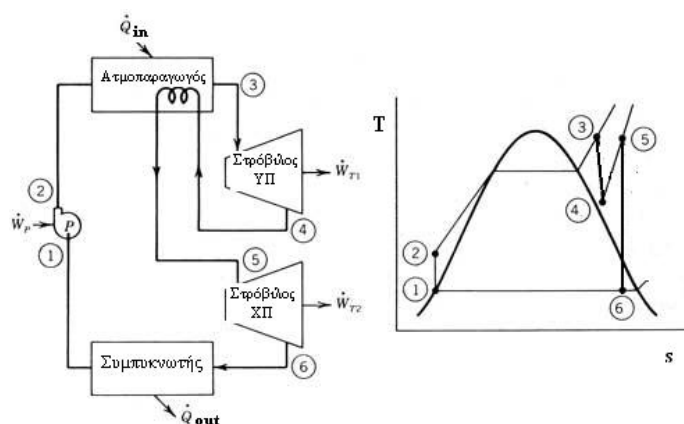
- i. Σταθερής ταχύτητας. Συναντάται σε στροβίλους που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή και περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα (3000 RPM)
- ii. Μεταβλητής ταχύτητας. Συναντάται σε στροβίλους που λειτουργούν σαν κινητήριες μηχανές αντλιών, συμπιεστών, συστημάτων πρόωσης πλοίων.

### 3.3.4.2 Βελτιώσεις κύκλου Rankine

Οι βελτιώσεις που εφαρμόζονται στον κύκλο Rankine έχουν σαν στόχο να πλησιάσουν τη θεωρητική λειτουργία του κύκλου Carnot και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της αρχικής και μείωσης της τελικής θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου.

- Ενδιάμεση αναθέρμανση εργαζόμενου μέσου.

Μέσω της αναθέρμανσης του ατμού μπορούμε να επιτύχουμε πρόσθετη θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο χωρίς να αυξάνουμε τη θερμοκρασία του, πράγμα που μπορεί να καταστρέψει τα πτερύγια του αμοστροβίλου. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ο υπέρθερμος ατμός (θέση 3) εκτονώνεται σε στρόβιλο μέχρι μια τιμή πίεσης (θέση 4). Αυτός καλείται στρόβιλος υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια ατμός επιστρέφει στο HRSG όπου και θερμαίνεται εκ νέου. Έπειτα, οδηγείται σε στρόβιλο μέσης ή χαμηλής πίεσης μέχρι την τελική συμπίκνωση (θέση 6).



Σχήμα 3.25 : Ενδιάμεση αναθέρμανση εργαζόμενου μέσου

Η αναθέρμανση του ατμού πρέπει να γίνει σε συγκεκριμένο εύρος πιέσεων (20-40 bar) ώστε να έχουμε μέγιστο ενεργειακό κέρδος. Ένα θετικό επακόλουθο της αναθέρμανσης είναι πως μειώνεται η υγρασία του ατμού. Η υγρασία αυτή καταπονεί αρκετά τα τελευταία μέρη του στρόβιλου. Είναι δυνατό να εφαρμοστούν περισσότερες από μία αναθερμάνσεις. Πρακτικά όμως, περισσότερες από δύο αναθερμάνσεις οδηγούν σε υψηλό κόστος

κεφαλαίου και πολυπλοκότητα εγκατάστασης, αντισταθμίζοντας το κέρδος στην απόδοση.

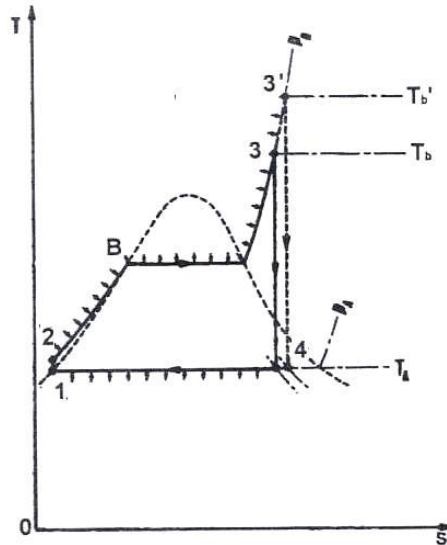
- Προθέρμανση τροφοδοτικού νερού με απομαστεύσεις ατμού.

Για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού του HRSG γίνονται απομαστεύσεις ατμού σε διάφορες βαθμίδες του αμοστροβίλου. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης που θα προσδιδόταν στο ψυκτικό μέσο στο συμπυκνωτή, μειώνεται η ποσότητα ατμού που συμπυκνώνεται κ συνεπώς μειώνονται οι απώλειες. Οι προθερμαντές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- i. Προθερμαντές ανοιχτού τύπου, όπου αναμειγνύεται ο απομαστευμένος ατμός με το τροφοδοτικό νερό.
- ii. Προθερμαντές κλειστού τύπου, όπου ο ατμός ρέει σε διαφορετικούς σωλήνες από το νερό.

- Αύξηση θερμοκρασίας τροφοδοσίας υπέρθερμου ατμού.

Η μεταβολή του κύκλου Rankine όταν αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου (θέση 3') στο στρόβιλο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Όπως βλέπουμε η θερμοκρασία εξόδου παραμένει σταθερή (θέση 4). Με την αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού επιτυγχάνεται μείωση της υγρασίας του ατμού στη έξοδο του αμοστροβίλου, με όλα τα θετικά που συνεπάγεται και αναφέρθηκαν προτύτερα. Η θερμοκρασία εισόδου του ατμού στο στρόβιλο δεν μπορεί να ξεπεράσει κάποια όρια, λόγω των ορίων αντοχής του στρόβιλου σε θερμική καταπόνηση. Στις μεγάλες υπάρχουσες εγκαταστάσεις η θερμοκρασία τροφοδοσίας υπέρθερμου ατμού δεν ξεπερνά τους 565 °C.



Σχήμα 3.26 : Επίδραση αύξησης θερμοκρασίας τροφοδοσίας

### 3.3.5 Αντλίες

Ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου αποτελείται από πληθώρα αντλιών οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Αντλίες συμπυκνώματος. Αντλούν το συμπύκνωμα από το συμπυκνωτή και το απορρίπτουν στη δεξαμενή νερού μέσω των προθερμαντών χαμηλής πίεσης.
- Τροφοδοτικές αντλίες. Αντλούν το νερό από τη δεξαμενή νερού και τροφοδοτούν το λέβητα ανάκτησης θερμότητας.
- Αντλίες κυκλοφορίας ψυκτικού νερού. Κυκλοφορούν το νερό στο εσωτερικό του συμπυκνωτή.

### 3.3.6 Συμπυκνωτής

Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που δέχεται ατμό από την έξοδο του ατμοστροβίλου υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία. Ο ατμός αυτός συμπυκνώνεται με τη βοήθεια νερού ή αέρα. Όσο μικρότερη είναι η πίεση στο συμπυκνωτή τόσο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αφού έχει επιτευχθεί μεγάλη θερμική πτώση στον ατμοστρόβιλο. Τέλος, ο συμπυκνωτής είναι το κομμάτι της εγκατάστασης με τις μεγαλύτερες απώλειες αφού η λανθάνουσα θερμότητα του ατμού απάγεται στο νερό ψύξης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΣΗΘ)**

### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Με τον όρο συμπαραγωγή καλείται η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.

Σημειώνεται πως δύναται και η παραγωγή ψύξης/κλιματισμού από τη θερμική ενέργεια μέσω μηχανών απορρόφησης. Στις περιπτώσεις που παράγεται ταυτόχρονα ηλεκτρισμός, θερμότητα και ψύξη η διαδικασία ονομάζεται τριπαραγωγή.

Κατά τη λειτουργία των συμβατικών θερμοηλεκτρικών σταθμών μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται είτε από το σύστημα ψύξης (συμπυκνωτής, πύργος ψύξης, ψυγείο νερού στους κινητήρες Diesel), είτε από τα καυσαέρια (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel και Otto κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών αυτών μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 35-45%, τα συστήματα συμπαραγωγής αγγίζουν βαθμούς απόδοσης της τάξης του 80-85%.



Σχήμα 4.1 Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμβατικού σταθμού παραγωγής ενέργειας με σύστημα ΣΗΘ

Οι κύριοι τομείς που βρίσκει εφαρμογή η συμπαραγωγή είναι οι εξής:

- Εγχώριο σύστημα ηλεκτρισμού
- Βιομηχανικός τομέας
- Εμπορικός-κτιριακός τομέας
- Αγροτικός τομέας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά ηλεκτροπαραγωγή υψηλής ισχύος, που βρίσκεται εφαρμογή κυρίως στο βιομηχανικό τομέα.

Στο βιομηχανικό τομέα πολλές διεργασίες απαιτούν θερμότητα παράλληλα με ηλεκτρισμό. Η απαιτούμενη θερμοκρασία οδηγεί στην παρακάτω κατηγοριοποίηση:

- i. Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών ( $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), π.χ. θέρμανση/ψύξη χώρων, ζεστό νερό χρήσης, ξήρανση γεωργικών προϊόντων.
- ii. Διεργασίες μετρίων θερμοκρασιών ( $100\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), π.χ. χαρτοποιία, εργοστάσια ζάχαρης. Συνήθως η θερμότητα προσδίδεται με τη μορφή ατμού.
- iii. Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών ( $300\text{-}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), π.χ. χημικές βιομηχανίες.
- iv. Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών ( $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), π.χ. εργοστάσια τσιμέντου, μεταλλουργική βιομηχανία.

Οι περισσότερες βιομηχανίες με μεγάλο δυναμικό συμπαραγωγής στις διεργασίες τους παράγουν ή αποβάλλουν θερμότητα σε πολύ καλή ποσότητα και ποιότητα. Η θερμότητα αυτή είναι σκόπιμο να ανακτηθεί και να προστεθεί στην ήδη παραγόμενη από το σύστημα συμπαραγωγής. Επίσης, ορισμένες χημικές διεργασίες παράγουν καύσιμα αέρια τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν σαν καύσιμο τόσο στους λέβητες όσο και στο ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής.

Αξίζει να αναφερθεί η δυνατότητα χρήσης της συμπαραγωγής για την κάλυψη των θερμικών φορτίων ολόκληρων πόλεων, γνωστή ως τηλεθέρμανση (district heating). Βέβαια, η απόσταση των καταναλωτών και η διασπορά τους αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη σκοπιμότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η απόστασης μονάδας-καταναλωτών δεν ξεπερνάει τα 10 km. Γνωστά παραδείγματα στην Ελλάδα αποτελούν οι πόλεις της Κοζάνης και της Πτολεμαΐδας.

#### **4.1.1 Ιστορική αναδρομή**

Η συμπαραγωγή έκανε την εμφάνισή της στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ το 1890. Η πλειονότητα των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων της εποχής αποτελούταν από σύστημα ατμολέβητα-ατμοστρόβιλου με καύσιμο άνθρακα. Η συμπαραγωγή βρήκε ευρεία εφαρμογή σε αυτές τις μονάδες. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα το 58% του ηλεκτρισμού που παραγόταν στις ΗΠΑ προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής.

Στην πορεία ακολούθησε κάμψη για δύο κυρίως λόγους:

- Η ανάπτυξη δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που πρόσφερε σχετικά φθηνό και αξιόπιστο ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η διαθεσιμότητα πετρελαίου και φυσικού αερίου, που έκαναν τη λειτουργία των λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Λόγω των παραπάνω η βιομηχανική συμπαραγωγή μειώθηκε στο 15% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής ως το 1950 και έφτασε το 5% το 1970.

Αυτή η κατάσταση έχει πλέον αντιστραφεί, κυρίως εξ' αιτίας της πετρελαϊκής κρίσης το 1973. Η ανοδική πορεία της συμπαραγωγής συνοδεύτηκε και από αντίστοιχη τεχνολογική πρόοδο, προσδίδοντας στα συστήματα μέγιστη αποδοτικότητα και αξιοπιστία.

## 4.2 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες:

- Τα συστήματα κορυφής (topping systems)
- Τα συστήματα βάσης (bottoming systems)

Στα συστήματα κορυφής ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας διοχετεύεται σε θερμικές διεργασίες, ακόμα και σε πρόσθετη ηλεκτροπαραγωγή.

Στα συστήματα βάσης, αρχικά παράγεται θερμικής ενέργεια για την κάλυψη βιομηχανικών αναγκών (π.χ. χαλυβουργία, βιομηχανία τσιμέντου) και στη συνέχεια τα θερμά αέρια διοχετεύονται σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας. Εκεί παράγεται ατμός και τροφοδοτεί ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι εφικτό τα θερμά αέρια να διοχετευθούν απευθείας σε αεριοστρόβιλο χωρίς την παρεμβολή λέβητα ανάκτησης θερμότητας.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων:

### 4.2.1 Συστήματα συμπαραγωγής ατμοστροβίλων

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής. Κατάλληλα για μεγάλο εύρος ισχύος, από 500 kW μέχρι πάνω από 200 MW. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγάλη ποικιλία καυσίμων με κατάλληλη διαμόρφωση του λέβητα. Ο βαθμός



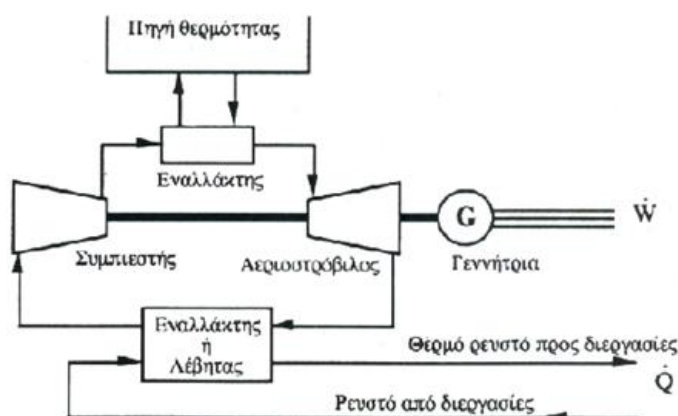
απόδοσης μιας τέτοιας εγκατάστασης το 60-85%, αντίθετα με τους συμβατικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς που ανέρχεται στο 35%.

Τα συστήματα αμμοστροβίλου παρέχουν υψηλή αξιοπιστία, της τάξης του 95% και μέγιστη διαθεσιμότητα στο 95%. Επίσης, ο χρόνος ζωής τους υπολογίζεται στα 25-35 χρόνια. Σαν μειονέκτημα έχουν το μεγάλο χρόνο εγκατάστασης που κυμαίνεται από 12-36 μήνες, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης. Οι βασικές διατάξεις αμμοστροβιλικών συστημάτων συμπαραγωγής αναλύονται στη συνέχεια, αφού είναι ίδιες με αυτές των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου.

#### 4.2.2 Συστήματα συμπαραγωγής αεριοστροβίλων

Οι δύο βασικές διατάξεις είναι τα συστήματα ανοιχτού και τα κλειστού τύπου.

- Συστήματα κλειστού τύπου. Στα συστήματα κλειστού τύπου, το εργαζόμενο ρευστό (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Θερμαίνεται σε κατάλληλη θερμοκρασία πριν την είσοδο στον αεριοστρόβιλο και ψύχεται μετά την έξοδο με τη χρήση εναλλάκτη. Καθώς το ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση των πτερυγίων του στροβίλου από τα προϊόντα της καύσης. Η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου στα συστήματα αυτά, όπως άνθρακα, βιομηχανικά απόβλητα, βιομάζα, υγρά ή αέρια καύσιμα παραγόμενα από βιομάζα. Ακόμη, πυρηνική και ηλιακή ενέργεια μπορούν να αποτελέσουν πηγή θερμότητας.



Σχήμα 4.2 : Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού τύπου

.Στην Ευρώπη και την Ιαπωνία λειτουργούν ήδη συστήματα κλειστού τύπου ισχύος 2-50 MW. Με την απόκτηση εμπειρίας προβλέπεται πως η αξιοπιστία

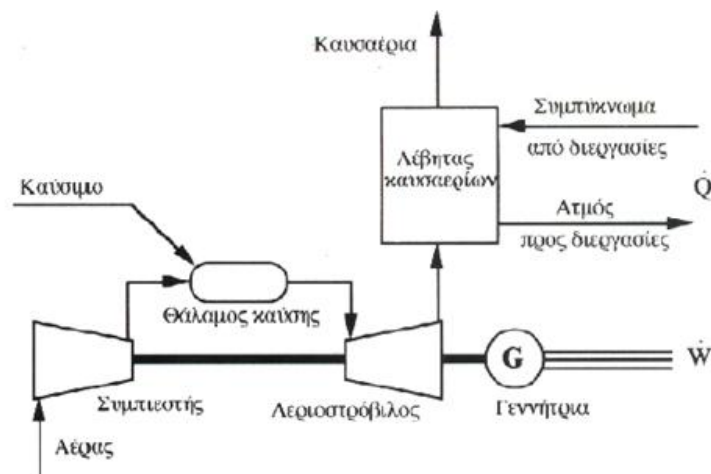
τέτοιων συστημάτων θα είναι τουλάχιστον ίση με αυτή των ανοιχτού τύπου και η διαθεσιμότητά τους μεγαλύτερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης που οφείλονται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού.

- Συστήματα ανοιχτού τύπου. Η πλειοψηφία των αεριοστροβλικών μονάδων είναι ανοιχτού τύπου. Τα καυσαέρια που αποτονώνουν το στρόβιλο και κινούν τη γεννήτρια εξέρχονται σε θερμοκρασίες 300-600 °C. Η σημαντική κατανάλωση ενέργειας από το συμπιεστή καθώς και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι λόγοι του μικρού βαθμού απόδοσης των συστημάτων (25-35% και έως 40% σε σύγχρονες μονάδες).

Η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων κάνει τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή και αυξάνει το βαθμό απόδοσης στην περιοχή του 60-80%. Η εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων γίνεται με δύο τρόπους:

- i. Άμεση χρήση σε θερμικές διεργασίες.
- ii. Διοχέτευση των καυσαερίων σε λέβητα ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ατμού, κατάλληλου τόσο για θερμικές διεργασίες όσο και για πρόσθετη ηλεκτροπαραγωγή (συνδυασμένος κύκλος).

Και στους δύο τρόπους είναι δυνατή η αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου των καυσαερίων με χρήση λέβητα συμπληρωματικής καύσης. Αυτό γίνεται χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα των καυσαερίων σε οξυγόνο, γεγονός που εκμεταλλεύεται από τους καυστήρες για καύση πρόσθετου καυσίμου.



**Σχήμα 4.3 :** Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού τύπου

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού τύπου έχουν ισχύ από 100 kW μέχρι 100 MW. Χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο ή πετρέλαιο diesel και παρουσιάζεται η προοπτική χρήσης γαιανθράκων σε αεριοποιημένη μορφή.

Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων απαιτεί μέριμνα, καθώς τα πτερύγια του αεριοστρόβιλου είναι εκτεθειμένα στα προϊόντα της καύσης. Τα προϊόντα αυτά πρέπει να είναι απαλλαγμένα από ουσίες που προκαλούν διάβρωση, όπως κάλιο, νάτριο, θείο, ασβέστιο και βανάδιο. Επιπλέον, τα σωματίδια στα καυσαέρια πρέπει να είναι μικρού μεγέθους ώστε να μην προκαλούν φθορά κατά την πρόσκρουσή τους στα πτερύγια. Εάν το καύσιμο αποτελείται από τέτοια συστατικά πρέπει να υποστεί καθαρισμό πριν την είσοδό του στο στρόβιλο. Αρκετές φορές ενδέχεται να απαιτείται καθαρισμός ακόμα και πριν την είσοδο του καυσίμου στο θάλαμο καύσης.

Ο χρόνος εγκατάστασης για μεγάλες μονάδες αεριοστρόβιλων ανοιχτού τύπου είναι τα δύο χρόνια. Η διάρκεια ζωής μιας τέτοιας εγκατάστασης ανέρχεται στα 15-20 έτη, αλλά μπορεί να μειωθεί λόγω κακής συντήρησης και χρήσης ακατάλληλου καυσίμου. Οι αεριοστρόβιλοι με καύση φυσικού αερίου παρουσιάζουν διαθεσιμότητα και αξιοπιστία ισάξια των ατμοστροβιλικών μονάδων. Αντίθετα, η χρήση πετρελαίου και άλλων υγρών καυσίμων αυξάνει τις ανάγκες συντήρησης συνεπώς μειώνει τη μέση ετήσια διαθεσιμότητα.

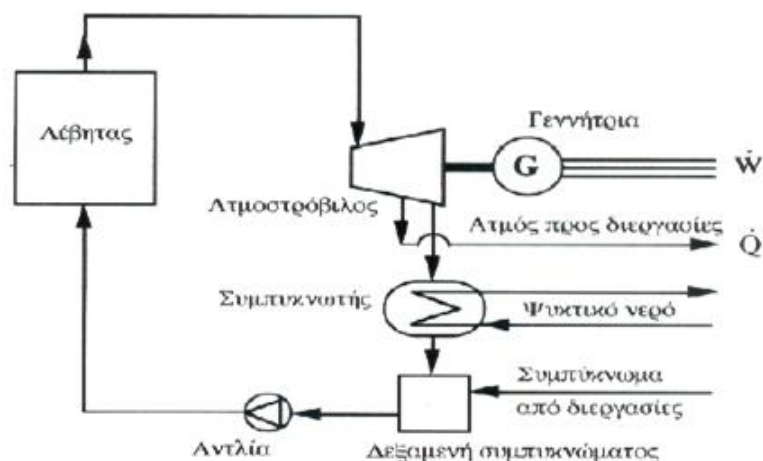
### **4.2.3 Συστήματα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου**

Όπως προαναφέρθηκε τα συστήματα συνδυασμένου κύκλου συνδυάζουν τους κύκλους Joule-Brayton και Rankine. Ο κύκλος κορυφής παράγει ηλεκτρική ενέργεια και αποβάλλει θερμότητα στον κύκλο βάσης μέσω λέβητα ανάκτησης θερμότητας (HRSG). Ο κύκλος βάσης χρησιμοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα για πρόσθετη ηλεκτροπαραγωγή.

Τα μέρη της εγκατάστασης από όπου μπορούμε να απάγουμε θερμότητα για διεργασίες είναι ο λέβητας ανάκτησης και η έξοδος του ατμοστροβίλου. Στον πρώτο, η απόρριψη θερμότητας δεν συνίσταται λόγω του ότι θα μειωθεί η ποσότητα παραγόμενου ατμού και συνεπώς ο βαθμός απόδοσης της μονάδας. Άρα η λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου σε συμπαραγωγή βασίζεται στη θερμότητα που παίρνουμε στην έξοδο του ατμοστροβίλου και αυτό γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους.

#### 4.2.4 Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Μέρος του ατμού απομαστεύεται σε μία ή και περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στρόβιλου, ενώ ο υπόλοιπος εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή (0,05-0,1 bar).

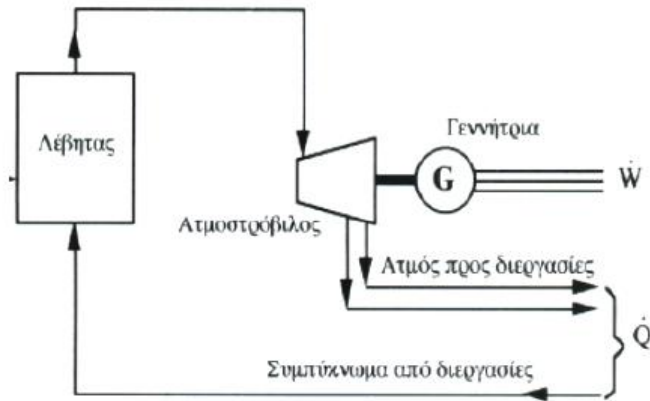


Σχήμα 4.4 : Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης

Τα συστήματα απομάστευσης είναι ακριβότερα και έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τα συστήματα αντίθλιψης που θα αναλυθούν παρακάτω (περίπου 80%). Έχουν όμως τη δυνατότητα ρύθμισης του ποσοστού θερμικής και ηλεκτρικής ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με την ολική ρύθμιση παροχής ατμού και επομένως της παροχής ατμού στο συμπυκνωτή.

#### 4.2.5 Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης

Ατμός υψηλής πίεσης (20-100 bar) και θερμοκρασίας (480-540 °C) παράγεται στο λέβητα ανάκτησης και διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο. Ο ατμός βγαίνει από το στρόβιλο με θερμοκρασία και πίεση κατάλληλη για θερμικές διεργασίες. Ο όρος αντίθλιψη σχετίζεται με το γεγονός ότι η πίεση εξόδου του ατμού από το στρόβιλο είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3-20 bar). Απομάστευση είναι και εδώ δυνατό να εφαρμοστεί.



*Σχήμα 4.5 : Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης*

Συγκριτικά με το σύστημα απομάστευσης, το σύστημα αντίθλιψης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- a) Απλούστερη μορφή
- b) Μικρότερο κόστος
- c) Μειωμένη έως καθόλου ανάγκη ψυκτικού νερού
- d) Υψηλότερο βαθμό απόδοσης (85%), κυρίως επειδή δεν αποβάλλει θερμότητα στο περιβάλλον

Σημαντικό μειονέκτημά του είναι πως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Έτσι συμπεραίνουμε ότι είναι αδύνατη η λειτουργία του συνδυασμένου κύκλου αποκλειστικά σε λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής.

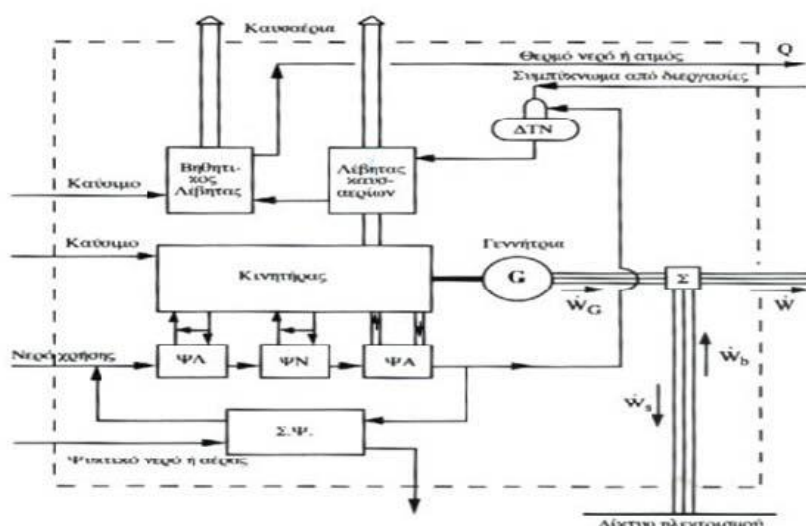
Η ισχύς των συστημάτων συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται στην περιοχή των 20 έως 400 MW. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) είναι μεγαλύτερη από τις συμβατικές αεριοστροβιλικές και ατμοστροβιλικές μονάδες. Ως προς τα καύσιμα ισχύει ότι προαναφέρθηκε για τον κύκλο Joule-Brayton. Ο απαιτούμενος χρόνος εγκατάστασης είναι 2-3 έτη. Ένα πλεονέκτημα είναι πως η εγκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο μέρη. Πρώτα να εγκατασταθεί η μονάδα του αεριοστρόβιλου σε χρόνο 12-18 μηνών και να λειτουργεί σε ανοιχτό κύκλο και έπειτα να συμπληρωθεί το σύστημα με τον ατμοστρόβιλο.

Η αξιοπιστία τέτοιων συστημάτων είναι 80-85%, η μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής είναι 15-25 έτη. Η λειτουργία σε μερικό φορτίο έχει αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

#### 4.2.6 Συστήματα συμπαραγωγής με παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης

Η συμπαραγωγή με συστήματα παλινδρομικών μηχανών μοιάζει αρκετά σε διάταξη με τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Αρκεί στη θέση του αεριοστρόβιλου να τοποθετήσουμε τη ΜΕΚ με τους εναλλάκτες που τη συνοδεύουν.

Όπως και στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων, τα καυσαέρια των κινητήρων μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα ή έμμεσα. Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι 300-400 °C, αισθητά χαμηλότερη από αυτά των αεριοστρόβιλων. Αυτό κάνει πιο επιτακτική την ανάγκη για συμπληρωματική θερμότητα. Η θερμότητα αυτή μπορεί να ληφθεί είτε με τοποθέτηση καυστήρα και προσαγωγή αέρα καύσης στο λέβητα καυσαερίων είτε με χρήση λέβητα συμπληρωματικής θερμότητας. Οι κινητήρες μεγάλης ισχύος παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής υπέρθεμου ατμού και χρήσης σε συνδυασμένο κύκλο.



Σχήμα 4.5 : Σύστημα συμπαραγωγής με ΜΕΚ

Στην παραπάνω σχηματική διάταξη φαίνεται ο κινητήρας ο οποίος δέχεται το καύσιμο και κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Η ανάκτηση της θερμότητας γίνεται από δύο σημεία:

1. Τα ρευστά που συνδέονται με τη λειτουργία της μηχανής (λάδι, νερό, αέρας)
2. Τα καυσαέρια

(Α) Αξιοποίηση θερμότητας από κύκλωμα ψύξης.

Είναι τεχνικά και σχεδιαστικά απλά συστήματα που εφαρμόζονται σε όλες τις υδρόψυκτες ΜΕΚ. Το κλειστό κύκλωμα ψύξης αποτελείται από αντλία και σειρά εναλλακτών. Το ψυκτικό μέσο (νερό) δεν ξεπερνά θερμοκρασίες τις τάξης των 95 °C, άρα δεν μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοδυναμικό κύκλο παραγωγής ισχύος.

(B) Αξιοποίηση θερμότητας που απορρίπτεται από τα καυσαέρια.

Η αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων διευκολύνεται από τις υψηλές τιμές θερμοκρασίας τους, παρεμποδίζεται όμως από τη μικρή τους παροχή συγκριτικά με τους αεριοστροβίλους. Επίσης, οι διακυμάνσεις στην παροχή και θερμοκρασία των καυσαερίων καθιστούν το σύστημα μη αξιόπιστο για σταθερή ζήτησης θερμικού φορτίου. Για τον καλύτερο έλεγχο της παραγωγής θερμότητας τοποθετείται βοηθητικός λέβητας συμπληρωματικής θερμότητας, σε μη συνεχή λειτουργία.

Η συγκέντρωση ισχύος στον κινητήρα αυξάνει με υπερπλήρωση του θαλάμου καύσης. Ο στροβιλοπληρωτής αποτελείται από αεριοστρόβιλο που κινείται με τα καυσαέρια του κινητήρα και κινεί με τη σειρά του φυγοκεντρικό αεροσυμπιεστή. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου από το στροβιλοπληρωτή (120-140 °C) ο αέρας έχει χαμηλή πυκνότητα. Για να αυξηθεί ο βαθμός πλήρωσης των κυλίνδρων ο αέρας ψύχεται στο ψυγείο αέρα προσφέροντας θερμότητα στο νερό χρήσης.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις στην έξοδο του αέρα από το ψυγείο: σε χαμηλή θερμοκρασία (περίπου 45 °C) και σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 90 °C). Η χαμηλή θερμοκρασία συνεπάγεται μεγάλο βαθμό πληρότητας και υψηλή συγκέντρωση ισχύος. Η ανακτώμενη, όμως, θερμότητα βρίσκει περιορισμένη χρήση λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας (30-35 °C). Η λύση αυτή μπορεί να εξυπηρετήσει περιπτώσεις όπου απαιτείται προθέρμανση του νερού χρήσης που εισέρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 20-25 °C.

Στην περίπτωση που το νερό χρήσης εισέρχεται στο σύστημα σε θερμοκρασία 60-70 °C (π.χ. από δίκτυα κεντρικής θέρμανσης η έξοδος του αέρα από το ψυγείο πρέπει να είναι σε υψηλή θερμοκρασία για πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας και αύξηση του βαθμού απόδοσης κατά 3-5 ποσοστιαίες μονάδες.

Με την ανάκτηση θερμότητας από τα τρία ψυγεία το νερό θερμαίνεται στους 75-80 °C. Ύστερα, εισέρχεται στον εναλλάκτη αποκομοιδής καυσαερίων όπου και φτάνει του 85-90 °C ή/και ατμοποιείται. Μονάδες μεσαίου μεγέθους παράγουν κορεσμένο ατμό 180-200 °C, ενώ μεγάλες μονάδες μπορούν να δώσουν υπέρθερμο ατμό με πίεση 15-20 bar και θερμοκρασία 250-350 °C .

Η ελάχιστη επιτρεπτή θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του εναλλάκτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Για καύσιμο Diesel, το όριο είναι 160-170 °C, ενώ για φυσικό αέριο είναι 90-100 °C.

Ο βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων μηχανών εσωτερικής καύσης είναι 35-45%, ενώ στις μεγάλες μηχανές αγγίζει το 50%. Ο βαθμός απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής με παλινδρομικές μηχανές φτάνει το 80%. Η διάρκεια ζωής των κινητήρων κυμαίνεται στα 15-20 χρόνια, αλλά συνδέεται στενά με ποιότητα καυσίμων και συντήρησης. Οι ΜΕΚ απαιτούν συχνότερη συντήρηση από τα υπόλοιπα συστήματα με αποτέλεσμα η ετήσια διαθεσιμότητα να ανέρχεται στο 80-90%.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα:

- i. Ο βαθμός απόδοσης εκτός του ότι είναι πολύ υψηλός, δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές του φορτίου (σταθερή κατανάλωση καυσίμου).
- ii. Η απόκριση του συστήματος στη μεταβολή φορτίου είναι πολύ γρήγορη, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει έντονη αύξηση κατανάλωσης καυσίμου στις μεταβατικές περιόδους.

#### **4.2.7 Λοιπά συστήματα συμπαραγωγής**

Αρκετές τεχνολογίες για συμπαραγωγή έχουν δοκιμαστεί ή πρόκειται να δοκιμαστούν στο μέλλον. Αυτές περιλαμβάνουν κύκλους Rankine με οργανικά ρευστά, κυψέλες καυσίμου, μηχανές Stirling κ.λπ.

Ακολουθεί συγκριτικός πίνακας όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών συμπαραγωγής.



Σύστημα	Ηλεκ. Ισχύς	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης %		Ολικός βαθμός απόδοσης	Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα
	MW	%	Πλήρες φορτίο	Φορτίο 50%	%	
Ατμοστρόβιλου	0,5 - 100*	90 - 95	14 - 30	12 - 25	60 - 85	0,1 - 0,3
Αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου	0,1 - 100	90 - 95	20 - 35	15 - 29	60 - 80	0,5 - 0,8
Αεριοστρόβιλου κλειστού κύκλου	0,5 - 100	90 - 95	30 - 35	30 - 35	60 - 80	0,5 - 0,8
Συνδυαζόμενο κύκλου αεριο/ατμοστρόβιλου	4 - 100*	77 - 85	35 - 45	25 - 35	70 - 88	0,6 - 1,1
Κινητήρα Diesel	0,07 - 40	80 - 90	35 - 45	32 - 40	60 - 80	1,2 - 2,4
Ποσέτο με παλινδρομικό κινητήρα	0,015 - 2	80 - 85	27 - 35	25 - 32	60 - 80	0,5 - 0,7
Κυψέλες καυσίμου	0,04 - 50	90 - 92	37 - 45	37 - 45	85 - 90	0,8 - 1,0
Μηχανές Stirling	0,003-1,5	85 - 90 (αναμενόμενη)	35 - 50	34 - 49	60 - 80	1,2 - 1,7

(\*) Η τιμή των 100 MW είναι το πιο συνηθισμένο άνω όριο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συστήματα του είδους αυτού κατασκευάζονται και με μεγαλύτερες ισχύεις.

**Σχήμα 4.6 : Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής**

### 4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τα συστήματα συμπαραγωγής διαχωρίζονται βάσει του τρόπου ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος στα εξής:

- Παραγωγής θερμότητας ίση με το απαιτούμενο θερμικό φορτίο (“heat match”), όπου εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πλεονάζει, πωλείται στο εθνικό δίκτυο, ενώ αν παρουσιάζεται έλλειψη συμπληρώνεται από το εθνικό δίκτυο.

- Παραγωγή ηλεκτρισμού ίση με το ηλεκτρικό φορτίο (“electricity match”). Απαιτείται βοηθητικός λέβητας για να συμπληρώνει τις επιπρόσθετες ανάγκες σε θερμότητα και αντίστοιχα ψυγείο για να απάγει την πλεονάζουσα θερμότητα.
- Μικτός τρόπος, συνδυάζοντας τους παραπάνω .
- Πλήρης κάλυψη θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου. Ο τρόπος αυτός απαιτεί άψογο σχεδιασμό και εφεδρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Έχει πολύ υψηλό αρχικό κόστος.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

### **5.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ**

#### **5.1.1 Γενικά**

Η μελέτη σκοπιμότητας αφορά την εγκατάσταση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εύρος ισχύος 50-60 MW<sub>el</sub> στην περιοχή της Κορίνθου. Η λειτουργία της μονάδας περιλαμβάνει ανακομιδή της απορριπτόμενης θερμότητας και αξιοποίηση της για κάλυψη θερμικών φορτίων (συμπαρογωγή). Η ανάκτηση της θερμότητας μπορεί να αξιοποιηθεί από την ίδια τη μονάδα, να πωληθεί σε παρακείμενες βιομηχανίες (π.χ θερμοκήπια, εργοστάσιο αλευροποιΐας) ή να καλύψει τις ανάγκες μέρους της οικιακής θερμικής ζήτησης στην πόλη της Κορίνθου. Για την εκλογή βέλτιστης λύσης θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ δύο τεχνολογιών :

- Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου.
- Μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ).

Επίσης θα μελετηθεί και η συμβατότητα των διαθέσιμων καυσίμων με την εκάστοτε τεχνολογία καθώς και η βέλτιστη επιλογή μεταξύ των :

- Φυσικό αέριο.
- Πετρέλαιο Diesel.
- Μαζούτ (HFO).

### **5.1.2 Στοιχεία τοποθεσίας**

- Ελάχιστη θερμοκρασία : 10 °C
- Μέγιστη θερμοκρασία : +30 °C
- Μέγιστη μέση υγρασία : 68 %

- Μέση μηνιαία βροχόπτωση : 400 mm
- Περιβάλλον : Βιομηχανικό

### 5.1.3 Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου

Η τεχνολογία του συνδυασμένου κύκλου έχει αναλυθεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η ηλεκτρική απόδοση του αεριοστρόβιλου βρίσκεται στο  $\eta=35\%$ . Τα καυσαέρια στη μονάδα HRSG παράγουν ατμό και τροφοδοτούν τον ατμοστρόβιλο. Η ηλεκτρική απόδοση του ατμοστρόβιλου προστίθεται σε αυτή του αεριοστρόβιλου και το σύστημα μπορεί να φτάσει σε απόδοση της τάξης του  $\eta=55\%$ . Εκμεταλλευόμενοι τα καυσαέρια με επιπλέον παραγωγή θερμότητας η απόδοση μπορεί να φτάσει στο  $\eta=90\%$ . Το κόστος μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου ανέρχεται στα 850-1000 Ευ/KWh, αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης.

Η πιο διαδεδομένη μορφή αεριοστρόβιλου χρησιμοποιεί ως καύσιμο φυσικό αέριο. Το πετρέλαιο Diesel μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση, όμως αυτό συνεπάγεται αύξηση του κόστους συντήρησης. Το μαζούτ δεν ενδείκνυται για καύση από αεριοστρόβιλο λόγω της επικάθισης σωματιδίων από τα καυσαέρια στα πτερύγια του στρόβιλου. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι ανέρχονται σε περίπου 360 g/KWh.

Για το μέγεθος ισχύος 50 MW<sub>el</sub> ο συνδυασμένος κύκλος δεν εφαρμόζεται συχνά ως λύση. Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης σε μεγέθη κάτω των 100 MW<sub>el</sub>. Επίσης, η εγκατάσταση είναι αρκετά πολυπλοκότερη από αυτή των ΜΕΚ. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης του συνδυασμού των δύο κύκλων και ο μικρός λόγος ηλεκτρισμού-θερμότητας (Power to heat ratio, PHR) μας επιτρέπουν να δοκιμάσουμε μια οικονομοτεχνική προσέγγιση της επένδυσης.

### 5.1.4 Μηχανές εσωτερικής καύσης

Η μονάδα θα αποτελείται από τις παλινδρομικές μηχανές, τις γεννήτριες και το σύστημα ανακομιδής θερμότητας.

Οι μηχανές που θα επιλεγθούν θα είναι διπλού καυσίμου (dual fuel) και θα μπορούν να λειτουργούν με πετρέλαιο Diesel, μαζούτ, φυσικό αέριο και βιοαέριο.

Η μονάδα θα αποτελείται από τα εξής περιφερειακά μέρη :

- Δεξαμενές καυσίμου (για υγρά καύσιμα). Στην περίπτωση χρήσης μαζούτ απαιτείται σύστημα επεξεργασίας και καθαρισμού του καυσίμου.
- Σύστημα αγωγών διασύνδεσης με τον τερματικό σταθμό φυσικού αερίου (για αέρια καύσιμα).
- Δεξαμενές λαδιού.
- Προωθητικές αντλίες για την τροφοδοσία των παραπάνω στις μηχανές.
- Σύστημα νερού ψύξης.
- Σύστημα εισαγωγής αέρα.
- Μονάδα ανακομιδής θερμότητας (HRSG).
- Βοηθητικός λέβητας συμπληρωματικής καύσης για κάλυψη επιπλέον θερμικών αναγκών.

Αναφορικά με τις εκπομπές ρύπων, όταν το καύσιμο είναι φυσικό αέριο οι ρύποι συνάδουν με τις οδηγίες της ΕΕ εφόσον πραγματοποιείται η απαιτούμενη συντήρηση και τηρούνται οι κανόνες λειτουργίας των μηχανών.

Για τη χρήση μαζούτ οι εκπομπές  $SO_x$  και  $CO_2$ , που σχετίζονται με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και άνθρακα, αντιμετωπίζονται με χρήση μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας θείου ( $S=1\%$ ). Αντίθετα, το φυσικό αέριο δεν περιέχει σημαντικές ποσότητες θείου, ενώ οι εκπομπές  $CO_2$  κινούνται στα ίδια επίπεδα. Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ ), ώστε να συνάδουν με την ισχύουσα Ευρωπαϊκή Οδηγία. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μείωσης των εκπομπών  $NO_x$  είναι η καταλυτική μείωση (Selective Catalytic Reduction, SCR). Το μέσο αγωγής που επικρατεί είναι η ουρία και οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν έως και 95%. Η τοποθέτηση συστήματος SCR κρίνεται απολύτως αναγκαία όταν το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι το μαζούτ.

Οι εκπομπές  $CO_2$  για καύση φυσικού αερίου ανέρχονται σε 450-500 g/KWh, ενώ για μαζούτ 330 g/KWh.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των μηχανών εσωτερικής καύσης κυμαίνεται στο  $\eta=43-48\%$ . Με την ενεργειακή εκμετάλλευση των καυσαερίων ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μπορεί να φτάσει σε επίπεδα  $\eta=83\%$ . Το κόστος μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με μηχανές εσωτερικής καύσης ανέρχεται περίπου στα 800 Ευ/KWh.

#### 5.1.4.1 Σύγκριση 2-χρονων και 4-χρονων μηχανών

Οι 4-χρονες μηχανές Diesel βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως ενώ οι 2-χρονες χρησιμοποιούνται πιο επιλεκτικά. Ακολουθεί συγκριτικός πίνακας :

	2 –S ENGINES	4 – S ENGINES
Μέγιστη Ισχύς	Υψηλότερη από τις 4-χρονες μηχανές	20 MW
Ηλεκτρική απόδοση	46 %	43 %
Μέση θερμοκρασία σχεδιασμού	40 °C	35 °C
Καύση μαζούτ	Εφαρμόσιμη. Κατανάλωση 190 g/KWh	Εφαρμόσιμη. . Κατανάλωση 198-200 g/KWh
Καύση φυσικού αερίου	Περιορισμένη. Απαιτείται η μίξη φυσικού αερίου με βαρύ κλάσμα πετρελαίου	-Εφαρμόσιμη -Οι μηχανές διπλού καυσίμου κατασκευάζονται μόνο ως 4-χρονες
Περιφερειακά συστήματα	Περισσότερα από τις 4-χρονες μηχανές	
Χρόνος ζωής	Περίπου 20 χρόνια. Μικρότερος χρόνος από τις 4-χρονες λόγω χειρότερου συστήματος λίπανσης	Περίπου 25 χρόνια
Ταχύτητα περιστροφής	100-300 rpm	Περίπου 500 rpm
Κατανάλωση λιπαντικού	Μεγαλύτερη από τις 4-χρονες	0,6-0,8 g/kWh
Γεννήτρια	Μεγαλύτερη από τις 4-χρονες λόγω μικρότερου αριθμού στροφών	
Κόστος συντήρησης	Περίπου 5 Ευ/MWh	Περίπου 2,8 Ευ/MWh
Διαστάσεις	Μεγαλύτερη από την 4-χρονη μηχανή	
Βάρος	Μεγαλύτερο από 4-χρονη μηχανή	
Μεταφορά	Η μονάδα μεταφέρεται σε κομμάτια	Η μηχανή μεταφέρεται συναρμολογημένη

*Πίνακας 5.1 : Σύγκριση 2-χρονων και 4-χρονων ΜΕΚ*

Ο Πίνακας 5.1 μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι 4-χρονες dual fuel μηχανές είναι η βιώσιμη λύση για την κάλυψη του μεγέθους των 50 MW<sub>el</sub>. Οι βασικές παράμετροι που οδήγησαν στο συμπέρασμα αυτό είναι :

- Η ευελιξία στη χρήση καυσίμου, ώστε να μπορεί η μονάδα να προσαρμόζεται στις εκάστοτε συνθήκες της αγοράς.
- Το δοκιμασμένο μοντέλο των 4-χρονων μηχανών σε πλήθος εφαρμογών με την υψηλή αξιοπιστία, τα μικρά κόστη συντήρησης σχετικά με τις 2-χρονες και τη μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Η μικρές απαιτήσεις σε κατανάλωση νερού. Οι απαιτήσεις των MEK για νερό αφορούν κυρίως το σύστημα ψύξης των μηχανών. Μια τυπική κατανάλωση σε νερό των MEK είναι 9 lit/MWh.
- Η ευελιξία και η μέση ετήσια διαθεσιμότητα. Η χρήση συνδυασμού πολλών μηχανών για την κάλυψη των 50 MW προσδίδει ευελιξία συστήματος στις μεταβολές φορτίου και γρήγορη απόκριση σε αυτές. Επίσης, αυξάνεται η διαθεσιμότητα καθώς η συντήρηση του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να παύει τη λειτουργία της η μονάδα όπως στον συνδυασμένο κύκλο.
- Ο μικρός χρόνος ολοκλήρωσης έργου. Συνήθως για τις MEK ο χρόνος εγκατάστασης είναι 12-15 μήνες. Αντίθετα, μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου απαιτεί έως και 3 έτη για την εγκατάσταση της πλήρης ισχύος.

#### 5.1.4.2 Επιλογή αριθμού MEK

	<i>1<sup>η</sup> Επιλογή</i>	<i>2<sup>η</sup> Επιλογή</i>	<i>3<sup>η</sup> Επιλογή</i>
Αριθμός μηχανών	1	2	3

Ισχύς ανά μηχανή (MW <sub>el</sub> )	50	25	17
Συνολική ισχύς (MW <sub>el</sub> )	1 x 50	2 x 25 = 50	3 x 17 = 51
Σχόλια	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οι 4-χρονες μηχανές διπλού καυσίμου δεν κατασκευάζονται με ισχύ 50 MW</li> <li>- Οι 2-χρονες μηχανές αν και είναι εμπορικά διαθέσιμες στην ισχύ των 50 MW, χρησιμοποιούν κυρίως μαζούτ</li> <li>- Μείωση μέσης ετήσιας διαθεσιμότητας</li> <li>- Μηδενική ευελιξία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οι 4-χρονες μηχανές διπλού καυσίμου δεν κατασκευάζονται με ισχύ 25 MW</li> <li>- Οι 2-χρονες μηχανές αν και είναι εμπορικά διαθέσιμες στην ισχύ των 25 MW, χρησιμοποιούν κυρίως μαζούτ</li> <li>- Ελάχιστη ευελιξία. Όταν η μία μηχανή δεν λειτουργεί η ισχύς της μονάδας μειώνεται στο μισό</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Οι 4-χρονες μηχανές διπλού καυσίμου είναι κατάλληλες για τα συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος</li> <li>- Οι 2-χρονες μηχανές αν και είναι εμπορικά διαθέσιμες στην ισχύ των 17 MW, χρησιμοποιούν κυρίως μαζούτ</li> <li>- Εφαρμοσμένη τεχνολογία παγκοσμίως</li> <li>- Μεγάλη ευελιξία</li> </ul>

*Πίνακας 5.2 : Συγκριτικός πίνακας για την επιλογή αριθμού ΜΕΚ*

### 5.1.5 Προτεινόμενες λύσεις

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση και βασιζόμενοι στους συγκριτικούς πίνακες συμπεραίνουμε πως οι δύο λύσεις που θα προταθούν για την υλοποίηση του έργου είναι ο συνδυασμός τριών 4-χρονων μηχανών διπλού καυσίμου και ο συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου. Θα μελετηθεί η βιωσιμότητα της επένδυσης



τόσο για τη χρήση φυσικού αερίου όσο και για τη χρήση μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (MEK).

### 5.1.5.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης

Οι μηχανές που θα τοποθετηθούν θα είναι της εταιρείας Wärtsilä.

<http://www.wartsila.com>

Συγκεκριμένα, επιλέγουμε τον κινητήρα **Wärtsilä 18V46DF** με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά :

	<b>Wärtsilä 18V46DF</b>
<b>Strokes</b>	4
<b>Speed</b>	500 rpm
<b>Cylinder output</b>	975 KW/cyl
<b>Power output</b>	17076 KWe
<b>Heat rate</b>	7669 KJ/KWh
<b>Electrical efficiency</b>	44,3%
<b>Fuel consumption (100% load)</b>	196 g/KWh
<b>Lube oil consumption</b>	0,8 g/KWh
<b>Exhaust gas flow</b>	32,4 kg/sec
<b>Exhaust gas temperature</b>	350 °C

*Πίνακας 5.3 : Τεχνικά χαρακτηριστικά Wärtsilä 18V46DF*

### 5.1.5.2 Συνδυασμένος κύκλος

Η επιλογή των στροβίλων έγινε από την εταιρεία Siemens.

<http://www.energy.siemens.com/entry/energy/hq/en/#/startscreen>

Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν είναι ο αεριοστροβίλος SGT-800 και ο ατμοστροβίλος SST-150 με τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά :

	<b>SGT-800</b>	<b>SST-150</b>
<b>Power output (MW)</b>	47	up to 20

<b>Electrical efficiency (η%)</b>	37,5	
<b>Heat rate (KJ/KWh)</b>	9597	
<b>Turbine speed (rpm)</b>	6608	up to 13300
<b>Exhaust pressure (back pressure) (bar)</b>		up to 10
<b>Exhaust pressure (condenser) (bar)</b>		up to 0,25

*Πίνακας 5.4 : Τεχνικά χαρακτηριστικά SGT-800 & SST-150*

## 5.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

### 5.2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία οικονομική σύγκριση των δύο περιπτώσεων που προέκυψαν πρωτύτερα και θα αξιολογηθεί η βέλτιστη. Γενικά, αξίζει να αναφερθεί η οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης είναι ζήτημα πολύπλοκο και αποτελεί από μόνο του μια ολόκληρη επιστήμη. Η εξαγωγή ασφαλών και αξιόπιστων συμπερασμάτων γίνεται με εξέταση πολλαπλών παραμέτρων και με συνεχή παρακολούθηση του ισχύοντος νομικού πλαισίου και της συμπεριφοράς των αγορών. Η αστάθεια στις αγορές συχνά μπορεί να οδηγήσει μια αρχικά προσοδοφόρα επένδυση σε ζημιά. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα γίνει μια όσο το δυνατό πιο πλήρης οικονομική προσέγγιση που θα λαμβάνει υπ' όψιν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνιστωσών του προβλήματος.

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί βασίζεται στη λογική του υπολογισμού των εξόδων εγκατάστασης και λειτουργίας της μονάδας σε αντιδιαστολή με τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας με σκοπό τον υπολογισμό του κέρδους και του χρόνου απόσβεσης.

Τα έξοδα εγκατάστασης περιλαμβάνουν τα εξής :

1. Προμήθεια και εγκατάσταση όλων των απαιτούμενων μηχανημάτων (μηχανή, γεννήτρια, πίνακες ελέγχου κ.λπ.)

2. Κατασκευή δικτύου παροχής φυσικού αερίου (για καύσιμο φυσικό αέριο)
3. Δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου (για καύσιμο μαζούτ)
4. Διασύνδεση της μονάδας με το δίκτυο της ΔΕΗ (απαιτείται και υποσταθμός ανύψωσης τάσης γεννήτριας με μετασχηματιστές καθώς και πίνακες ελέγχου και μετρητικά όργανα της ΔΕΗ)
5. Δομικές εργασίες (κτίριο στέγασης μηχανών)
6. Έξοδα τεχνικής μελέτης και αδειοδότησης

Τα λειτουργικά έξοδα αφορούν τα εξής :

1. Προμήθεια καυσίμου
2. Δαπάνες συντήρησης
3. Μισθοί προσωπικού
4. Ασφάλειες
5. Κόστος ιδίων κεφαλαίων

Θα υποθέσουμε πως το κεφάλαιο καταβάλλεται ολόκληρο από τον επενδυτή χωρίς να καλυφθούν τα έξοδα με τραπεζικό δάνειο.

### **5.2.2 Πληθωρισμός**

Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση της μεθοδολογίας υπολογισμών θα πρέπει να ορίσουμε την έννοια του πληθωρισμού που θα συναντήσουμε στη συνέχεια.

Πληθωρισμός, ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή του γενικού επιπέδου των τιμών μιας οικονομίας σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Παράγοντες που επηρεάζουν τον πληθωρισμό αφορούν την τεχνολογία, τις διεθνείς αγορές καθώς και πολιτικά και κοινωνικά δεδομένα της χώρας.

Στην αξιολόγηση μιας επένδυσης δεν μπορούμε να παραβλέψουμε τον πληθωρισμό. Αρκετά από τα μεγέθη που μας αφορούν, όπως η τιμή αγοράς καυσίμου, η τιμή

πώλησης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας και το κόστος συντήρησης, πληθωρίζονται με κάποιο ποσοστό κάθε χρόνο.

Η εκτίμηση του συντελεστή πληθωρισμού είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί καθώς είναι μέγεθος ευμετάβλητο και καθορίζεται από πληθώρα παραγόντων.

### 5.2.2.1 Πληθωρισμός ηλεκτρικής ενέργειας

Η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για συμπαραγωγή το 2008 ήταν 80,14 Eu/MWh, ενώ το 2011 διαμορφώθηκε στα 87,85 Eu/MWh. Συνεπώς, παρατηρείται μια αύξηση της τάξης του 10% τα τελευταία 2 χρόνια.

Επομένως, στη μελέτη που θα ακολουθήσει τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν θα είναι σταθερά, αλλά θα πληθωρίζονται με ένα ποσοστό 10% ανά δύο έτη και σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$E_1=87,14*HE$$

$$E_2=E_1$$

$$E_3=E_2*(1+10\%)$$

.

.

.

$$E_v=E_{v-1}$$

$$E_{v+1}=E_v*(1+10\%), \text{ όπου } E_v \text{ τα έσοδα της } v \text{ χρονιάς και } v \text{ άρτιος.}$$

### 5.2.2.2 Πληθωρισμός καυσίμου

Η τιμή πώλησης του φυσικού αερίου το 2009 ήταν 0,0423 Eu/KWh, το 2010 ήταν 0,0442 Eu/KWh και το 2011 0,0464 Eu/KWh. Παρατηρούμε μια αύξηση της τιμής

του φυσικού αερίου κατά 9,7% τα τελευταία 2 έτη. Άρα, θα θεωρήσουμε πως η τιμή του φυσικού αερίου πληθωρίζεται με 5% κάθε χρόνο.

Το ποσοστό αυτό θα εφαρμοσθεί τόσο στις δαπάνες για αγορά καυσίμου όσο και στα έσοδα από την πώληση ή αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας (εφόσον θα ήμασταν υποχρεωμένοι να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον λέβητα για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας).

Για την περίπτωση χρήσης μαζούτ δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία οπότε θα θεωρήσουμε το ίδιο ποσοστό που εφαρμόζεται στο φυσικό αέριο και αυτό υπολογίζεται βάσει της σχέσης :

$$E_v = E_{v-1} * (1 + 5\%) \quad , \quad \text{έσοδα από θερμική ενέργεια}$$

$$C_v = C_{v-1} * (1 + 5\%) \quad , \quad \text{έξοδα αγοράς καυσίμου}$$

### 5.2.2.3 Πληθωρισμός κόστους συντήρησης

Το κόστος συντήρησης της μονάδας θα πληθωριστεί και αυτό και περιλαμβάνει μισθούς, ανταλλακτικά κ.λπ. Το ποσοστό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το 1%, ως το μέσο όρο αύξησης των μισθών που ισχύει για τα ελληνικά δεδομένα. Το κόστος συντήρησης διαμορφώνεται κάθε έτος ως εξής :

$$C_v = C_{v-1} * (1 + 1\%)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο πληθωρίζεται το κόστος ασφάλειας.

### 5.2.3 Ανάλυση μεθοδολογίας υπολογισμών

### 5.2.3.1 Υπολογισμός εξόδων

#### 5.2.3.1.1 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης λήφθηκε μετά από επικοινωνία με την εταιρεία και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα :

<b>Wärtsilä 18V46DF</b>	<b>Κατανάλωση</b>	<b>Τιμή μονάδας</b>	<b>Κόστος</b>
<b>Κόστος εγκατάστασης μονάδας</b>		800 Eu/KWh	<b>40 MEu</b>
<b>Κόστος λιπαντικού ελαίου</b>	0,77 gr/KWh	2,00 Eu/Kg	<b>1,54 Eu/MWh</b>
<b>Κόστος ουρίας</b>	8,4 gr/KWh	400 Eu/TN	<b>3,36 Eu/MWh</b>
<b>Κόστος συντήρησης</b>			<b>2,80 Eu/MWh</b>
<b>Μεταβλητά κόστη</b>	90.000 Eu/month		<b>2,70 Eu/MWh</b>

*Πίνακας 5.5 : Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης Wärtsilä 18V46DF*

Για την επιλεγμένη μονάδα συνδυασμένου κύκλου δεν μπορέσαμε να βρούμε πληροφορίες απευθείας από την εταιρεία. Έτσι, οι τιμές που επιλέξαμε προσπαθήσαμε να είναι το δυνατό πιο κοντά σε πραγματικά μεγέθη.

#### 5.2.3.1.2 Απόσβεση

Στη γλώσσα των οικονομικών απόσβεση είναι η μείωση της αξίας ενός πάγιου περιουσιακού στοιχείου από τη φθορά που υπέστη είτε λόγω της παρόδου του χρόνου είτε λόγω χρήσης είτε λόγω της προόδου της τεχνολογίας (τεχνολογική απαξίωση). Η απόσβεση υπολογίζεται από το πρώτο έτος λειτουργίας της εγκατάστασης.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι υπολογισμού της απόσβεσης εγκεκριμένοι από το νόμο :

1. Η σταθερή μέθοδος, όπου οι αποσβέσεις υπολογίζονται με εφαρμογή σταθερού συντελεστή επί της αρχικής αξίας κτίσης.
2. Η φθίνουσα μέθοδος, όπου ο συντελεστής απόσβεσης παραμένει σταθερός, αλλά εφαρμόζεται στην αξία των πάγιων στοιχείων που έχει απομείνει από τις προηγούμενες αποσβέσεις.

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε πως πρέπει να ορίσουμε συγκεκριμένη ωφέλιμη διάρκεια ζωής της μονάδας. Αυτή η διάρκεια θα ορισθεί στα 25 έτη, μέγεθος που εφαρμόζεται στις μηχανές εσωτερικής καύσης μεγάλης ισχύος. Η μέθοδος που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε στη δική μας ανάλυση είναι η σταθερή. Συνεπώς ο συντελεστής απόσβεσης θα ορισθεί στο  $\alpha=4\%$ .

Η σταθερή ετήσια απόσβεση καθορίζεται από τη σχέση :

$$C_a = \alpha \cdot C = 0,04 \cdot C \quad , \text{ όπου } C \text{ το αρχικό κόστος επένδυσης}$$

### 5.2.3.1.3 Κόστος καυσίμου

Γνωρίζοντας την ισχύ ( $P_{out}$ ) και την απόδοση ( $\eta\%$ ) των μηχανών και του αεριοστρόβιλου μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το απαιτούμενο ποσό ενέργειας που χρειάζεται για να παραχθεί η επιθυμητή ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Σημειώνεται πως για τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου στη σχέση αντικαθίσταται το μέγεθος  $\eta\%$  ως η απόδοση του αεριοστρόβιλου εφόσον ο ατμοστρόβιλος κινείται αποκλειστικά με ατμό παραγόμενο από ανακτημένη θερμότητα χωρίς συμπληρωματική καύση στο λέβητα ανάκτησης. Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω είναι η εξής :

$$P_{kau} = \frac{P_{out} \cdot 100}{\eta \%}$$

, όπου  $P_{out}$  η ισχύς της εγκατάστασης σε MW και η% η απόδοση της μηχανής ή αεριοστρόβιλου αντίστοιχα.

Βάσει των τιμολογίων της ΔΕΠΑ για το 2011 η μέση τιμή πώλησης φυσικού αερίου είναι 46 Eu/MWh. Η λειτουργία της μονάδας θα είναι 8000 ώρες ετησίως σε περίπτωση επιλογής κάλυψης των φορτίων με μηχανές διπλού καυσίμου και 7000 ώρες στην περίπτωση μονάδας συνδυασμένου κύκλου.

Άρα υπολογίζουμε το ετήσιο κόστος από τη σχέση :

$$C_{ng} = P_{out} \cdot (Ετήσιες \ ώρες \ λειτουργίας) \cdot (τιμή \ φυσικού \ αερίου)$$

Αναφορικά με τη χρήση μαζούτ στις ΜΕΚ, η τιμή του στις 19-9-2011 ανερχόταν στα 502,21 Eu/ton. Από τις πληροφορίες του κατασκευαστή γνωρίζουμε πως η κατανάλωση της μηχανής σε μαζούτ είναι 0,196 kg/KWh.

Το κόστος της MWh ανέρχεται στα :

$$C_{MWh} = 0,196 \cdot 502,21 = 99,43 \text{Eu} / \text{MWh}$$

Το ετήσιο κόστος αγοράς μαζούτ θα προκύπτει από τη σχέση :

$$C_{μαζ} = C_{MWh} \cdot P_{out} \cdot (Ετήσιες \ ώρες \ λειτουργίας)$$

#### 5.2.3.1.4 Έξοδα προσωπικού



Για τη σωστή λειτουργία του σταθμού απαιτούνται 4-5 άτομα για τη συνεχή εποπτεία της μονάδας. Το κόστος προσωπικού υπολογίστηκε στις 60000 Eu/yr.

$$C_{staff} = 60000Eu$$

#### 5.2.3.1.5 Ασφάλειες

Σε κάθε επένδυση απαιτείται ασφάλιση σε περίπτωση βλάβης ή ζημιάς, ώστε να αποκατασταθεί χωρίς επιβάρυνση του επενδυτή. Το κόστος της ασφάλειας θα υπολογισθεί ως το 1% της αρχικής επένδυσης.

$$C_{ins} = 1\% \cdot C \quad , \text{ όπου } C \text{ το αρχικό κόστος της επένδυσης}$$

#### 5.2.3.1.6 Κόστος ιδίων κεφαλαίων

Το κόστος ιδίων κεφαλαίων είναι τα χρήματα που θα κέρδιζε ο επενδυτής αν επένδυε κάπου αλλού τα κεφάλαια που απαιτήθηκαν για την υλοποίηση της εγκατάστασης, π.χ. να τα κατέθετε σε τράπεζα. Το κόστος αυτό αναλογεί στο 1,5% επί της αξίας των ιδίων κεφαλαίων που χρησιμοποιήθηκαν. Το κόστος δεν θα το πληθωρίσουμε.

$$C_{cap} = 1,5\% \cdot C' \quad , \text{ όπου } C' \text{ το ίδιο κεφάλαιο της επένδυσης}$$

#### 5.2.3.2 Υπολογισμός εσόδων

### 5.2.3.2.1 Έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της μονάδας θα διοχετεύεται εξ' ολοκλήρου στο δίκτυο της ΔΕΗ. Σύμφωνα με το νόμο 3468, άρθρο 9 ο αρμόδιος Διαχειριστής του Συστήματος οφείλει να δίνει προτεραιότητα στις μονάδες ΣΗΘ κατά την κατανομή του φορτίου ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ. Αυτό εξασφαλίζει συνεχή ροή εσόδων και πώληση της ενέργειας χωρίς κίνδυνο.

Από την ιστοσελίδα της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας ([www.rae.gr](http://www.rae.gr)) λάβαμε τις ισχύουσες τιμές απορρόφησης της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘ.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από:	Τιμή Ενέργειας (€/MWh)	
	Διασυνδεδεμένο Σύστημα	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
(α) Αιολική ενέργεια	87,85	99,45
(β) Αιολική ενέργεια από αιολικά πάρκα στη θάλασσα	104,85	
(γ) Υδραυλική ενέργεια που αξιοποιείται με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς με Εγκατεστημένη Ισχύ έως δεκαπέντε (15) MWe	87,85	99,45
(στ) Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από μονάδες άλλης τεχνολογίας, πλην αυτής των φωτοβολταϊκών, με Εγκατεστημένη Ισχύ έως πέντε (5) MWe	264,85	284,85
(ζ) Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από μονάδες άλλης τεχνολογίας, πλην αυτής των φωτοβολταϊκών, με Εγκατεστημένη Ισχύ μεγαλύτερη των πέντε (5) MWe	244,85	264,85
η) Γεωθερμική ενέργεια, βιομάζα, αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και βιοαέρια	87,85	99,45
(θ) Λουπές Α.Π.Ε.	87,85	99,45
(ι) Σ.Η.Θ.Υ.Α	87,85	99,45

**Πίνακας 5.6 : Τιμή απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές μονάδες ΑΠΕ και ΣΗΘ**

Από τον Πίνακα 5.6 παρατηρούμε πως η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή το 2011 ανέρχεται στα 87,85 €/MWh. Η τιμή αυτή το 2009 ήταν

80,14 Ευ/MWh, ενώ το 2007 73 Ευ/MWh. Παρατηρούμε πως η τιμή πληθωρίζεται κατά 10% κάθε 2 έτη.

Γνωρίζοντας τη συνολική παραγωγή ενέργειας και την τιμή πώλησης της MWh υπολογίζουμε τα ετήσια έσοδα με την εξής σχέση :

$$E_{el} = t \cdot HE$$

, όπου  $HE = P_{out}$  \*(ετήσιες ώρες λειτουργίας) και t η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

#### **5.2.3.2.2 Έσοδα θερμικής ενέργειας**

##### **5.2.3.2.2.1 Υπολογισμός εσόδων για MEK**

Τα θερμικά κέρδη από τα καυσαέρια και το σύστημα ψύξης των μηχανών βρίσκουν εφαρμογή στην προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στους συμπιεστές, την κάλυψη αναγκών για θέρμανση της μονάδας ή την πώληση τους σε παρακείμενες βιομηχανίες για διάφορες εφαρμογές (π.χ. θέρμανση χώρων, θερμικές διεργασίες χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας). Έτσι, τα έσοδα μπορεί να είναι πραγματικά χρήματα, από την πώληση θερμικής ενέργειας ή εξοικονόμηση χρημάτων από καύση φυσικού αερίου για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας. Στην τελευταία περίπτωση θεωρούμε βαθμό απόδοσης του λέβητα  $\eta=85\%$  για τη συνέχιση των υπολογισμών.

Από το τμήμα τεχνικής υποστήριξης της εταιρίας Wärtsilä πήραμε ορισμένα κρίσιμα μεγέθη που θα μας βοηθήσουν στον υπολογισμό του ποσού θερμότητας που μπορούμε να ανακτήσουμε. Να αναφερθεί πως ο εναλλάκτης θα χρησιμοποιεί σαν μέσο το νερό.

Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στον εναλλάκτη : 350 °C

Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από εναλλάκτη : 180 °C

Ροή καυσαερίων (V) : 32,4 kg/sec

Ειδική θερμότητα καυσαερίων ( $c_{kaus}$ ) : 1,1 kJ/kgK

Η θερμική ενέργεια που ανακτάται δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$Q = V \cdot \Delta T \cdot c_{kaus} = 32,4 \cdot (350 - 180) \cdot 1,1 = 6058 \text{ KW} \approx 6,06 \text{ MW}_{th}$$

Συνεπώς οι τρεις μηχανές παράγουν 18,18 MW<sub>th</sub>.

Η ετήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι :

$$\Theta E = 18,18 \text{ MW} \cdot (\text{ετήσια ενέργεια λειτουργία})$$

Στο σημείο αυτό θα υποθέσουμε πως η παραγόμενη θερμική ενέργεια θα διανέμεται ισομερώς σε θερμικές ανάγκες της μονάδας και σε θερμικές ανάγκες παρακείμενης βιομηχανίας.

Βασιζόμενοι σε όλα τα παραπάνω υπολογίζουμε τα ετήσια έξοδα ως εξής :

$$E_{th} = t \cdot (\Theta E / 2) + t \cdot (\Theta E / 2) \cdot \frac{t}{h_{leb}}$$

, όπου  $t$  η τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας και  $\eta_{\text{λεβ}}$  ο βαθμός απόδοσης λέβητα που θα απαιτούταν για κάλυψη των ίδιων θερμικών φορτίων.

#### 5.2.3.2.2.2 Υπολογισμός εσόδων για συνδυασμένο κύκλο

Ο υπολογισμός των θερμικών κερδών από μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου είναι διαδικασία αρκετών υπολογισμών οι οποίοι ακολουθούν. Τα δεδομένα έχουν παρθεί από τα τεχνικά φυλλάδια των στρόβιλων. Τα μεγέθη : ειδική θερμότητα καυσαερίων, βαθμός απόδοσης αμοστροβίλου και θερμοκρασία εξόδου ατμού από το στρόβιλο έχουν θεωρηθεί προσεγγιστικά. Να τονίσουμε πως οι προσεγγίσεις είναι ρεαλιστικές και εντός των ορίων των διεθνών κανονισμών.

	Παράμετροι αεριοστροβίλου SGT- 800	Παράμετροι αμοστροβίλου SST- 150
Ισχύς (MW)	47	
Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων ( $T_{\text{out}}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	544	
Ροή καυσαερίων (V) (kg/sec)	131,5	
Ειδική θερμότητα καυσαερίων ( $c_{\text{HRSG}}$ ) (KJ/kgK)	1,1	
Θερμοκρασία υπερθέρμανσης ( $T_{\text{sup}}=T_{\text{out}}-20^{\circ}\text{C}$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )		524
Πίεση ατμού (bar)		50
Πίεση αντίθλιψης (bar)		10
Βαθμός απόδοσης αμοστροβίλου ( $\eta_{\text{st}}$ )		0,80

Πίνακας 5.7 : Παράμετροι λειτουργίας SGT-800 & SST-150

#### Παροχή ατμού

Από τους Πίνακες του βιβλίου «Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί» του Η. Κροντήρη παίρνουμε  $T_{\text{κορεσμού}} = 263,91^{\circ}\text{C}$  για πίεση  $P = 50 \text{ bar}$ . Για τα καυσαέρια θα θεωρήσουμε την  $T_{\text{κορεσμού}}$  προσαυξημένη κατά  $10^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T_{\text{pinch point}}$ ).

Άρα,  $T_{pinch}=273,91$  °C. Η παρεχόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια είναι :

$$Q=(T_{out}-T_{pinch})\cdot c_{HRSG}\cdot V=(544-273,91)\cdot 1,1\cdot 131,5=39,068MW$$

Με γραμμική παρεμβολή από τους Πίνακες παίρνουμε :

$$h_{atm\acute{o}}(50bar, T_{sup})=3461KJ/kg$$

$$h_{kor.ner\acute{o}}=1155KJ/kg$$

$$\Delta h=h_{atm\acute{o}}-h_{kor.ner\acute{o}}=2306KJ/kg$$

Η παροχή του ατμού ισούται με :

$$\text{Παροχή ατμού}=Q/\Delta h=39,068/2306=16,94kg/sec$$

Ισχύς εξόδου ατμοστροβίλου

$$h_{eis}=h_{atm\acute{o}}=3461KJ/kg$$

$$P_{ex}=10bar \quad (\text{Πίεση αντίθλιψης})$$

Σε αυτό το σημείο θα υποθέσουμε, λόγω έλλειψης δεδομένων, πως η τιμή της θερμοκρασίας εξόδου του ατμού από το στρόβιλο είναι  $T_{εξ\acute{o}δου}=180$  °C.

Από τους Πίνακες βρίσκουμε την ενθαλπία του ατμού στην έξοδο του στροβίλου :

$$h_{ex} = 3005 \text{ KJ / kg}$$

Η ισχύς εξόδου του ατμοστροβίλου είναι :

$$\begin{aligned} \text{IscύV atmostróbilou} &= (h_{eis} - h_{ex}) \cdot h_{atm} \cdot (\text{parochή atmoú}) = \\ &= (3461 - 2778) \cdot 0,80 \cdot 16,94 = 9256 \text{ KW} = 9,25 \text{ MW} \end{aligned}$$

Για όλες τις μονάδες HRSG που υπάρχουν σε μία μονάδα ΣΗΘ τα θερμικά κέρδη από την παραγωγή ατμού αντιμετωπίζονται ως εξοικονόμηση στην κατανάλωση εναλλακτικού καυσίμου. Η ισοδύναμη ενεργειακή κατανάλωση βασίζεται στο ενεργειακό περιεχόμενο του ατμού και έχει ως σημείο αναφοράς το ενεργειακό περιεχόμενο του νερού σε θερμοκρασία 10 °C και πίεση 1,013 bar πολλαπλασιαζόμενο με συντελεστή 1,2.

Στην περίπτωση μας έχουμε κορεσμένο ατμό πίεσης 10 bar και ενθαλπίας 2778 KJ/kg. Αφαιρούμε 42 KJ/kg που είναι η ενθαλπία του νερού στους 10 °C και πίεση 1,013 bar.

$$2736 \text{ KJ / kg} \cdot 1,2 = 3283 \text{ KJ / kg} = 0,919 \text{ MWh / ton}$$

Ανατρέχοντας στην παροχή ατμού που υπολογίστηκε παραπάνω βρίσκουμε 60,984 ton/hour.

Η ωριαία θερμική ενέργεια του συστήματος είναι :





### 5.3.1 Μηχανές εσωτερικής καύσης

ΕΞΟΔΑ		
Κόστος επένδυσης ανά KWh	800	Eu
Εγκατεστημένη ισχύς	51,288	MW
Αρχικό κόστος επένδυσης	41030400	Eu
Επιδότηση	40%	
Τελικό κόστος επένδυσης	24618240	Eu
Ίδια κεφάλαια	24618240	Eu
Αποσβέσεις (σταθερές) 4%	984729,6	Eu/yr
Κόστος ιδίων κεφαλαίων 1,5%	369273,6	Eu

ΕΣΟΔΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	410304	MWh/yr
Τιμή πώλησης ηλ. ενέργειας	87,85	Eu
Πληθωρισμός	10%	
Ετήσιες πωλήσεις	36045206	Eu

ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ)		
Κατανάλωση καυσίμου	925104	MWh/yr
Τιμή αγοράς καυσίμου	46	Eu/MWh
Πληθωρισμός	5%	
Ετήσιο κόστος	42554784	Eu

ΕΣΟΔΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		
Παραγωγή θερμικής ενέργειας	145440	MWh/yr
Τιμή αγοράς καυσίμου	0,05	Eu/KWh
Πληθωρισμός	5%	
Ετήσιες πωλήσεις	7913647	Eu

ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟ (ΜΑΖΟΥΤ)		
Κατανάλωση καυσίμου	0,198	kg/KWh
Τιμή μονάδας μαζούτ	502,21	Eu/ton
Κόστος ανα MWh	99,43758	Eu/MWh
Πληθωρισμός	5%	
Ετήσιο κόστος	39775032	Eu

ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ				
*Συντήρηση	2,7	Eu/MWh	1080000	Eu/yr
Πληθωρισμός	1%			
*Μισθοί (Επιδότηση 40%)	36000	Eu/yr		
Πληθωρισμός	1%			
*Ασφάλεια	410304	Eu/yr		
Πληθωρισμός	1%			
*Διπλανικά	3,36	Eu/MWh	1344000	Eu/yr
*Ουρία	1,54	Eu/MWh	616000	Eu/yr
	<b>Total :</b>		3486304	Eu/yr

**Πίνακας 5.8 : Υπολογισμός εσόδων/εξόδων για ΜΕΚ**

Στον Πίνακα 5.8 φαίνονται οι υπολογισμοί των εσόδων και εξόδων της μονάδας ΜΕΚ ώστε να προκύψει η χρηματοροή του έργου για τη διάρκεια των 25 ετών. Από στοιχεία που λάβαμε από την εταιρεία Wärtsilä το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 800 Eu/KWh . Δεδομένης της ισχύς των τριών μηχανών στα 51,288 MW το κόστος επένδυσης ανέρχεται στα 41,03 MEu. Από την παράγραφο 5.2.4.2.3 προκύπτει κρατική επιδότηση 40% επί του συγκεκριμένου ποσού. Επίσης

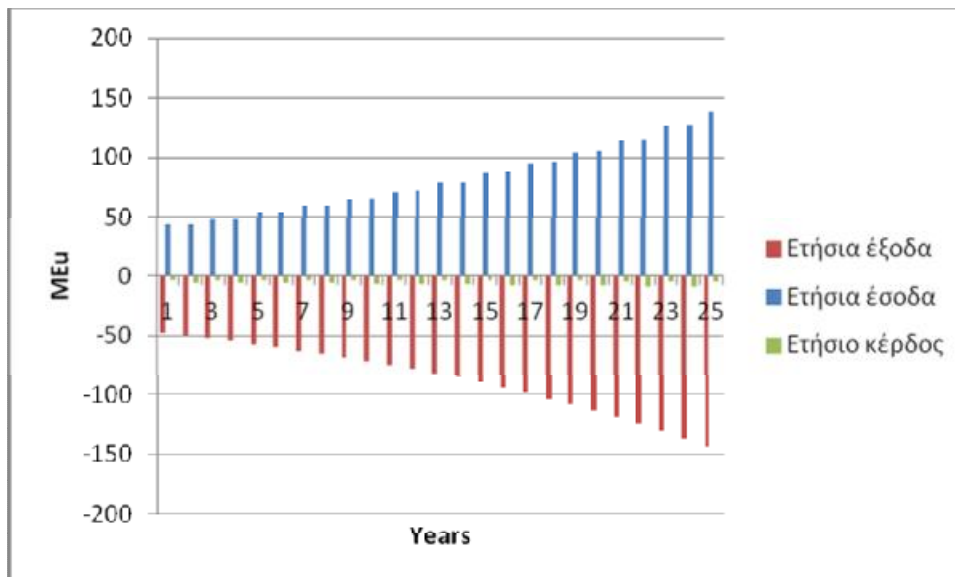
υπολογίζονται τα έξοδα καυσίμου, συντήρησης κ.λπ. καθώς και τα έσοδα θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, όλα με τον ανάλογο πληθωρισμό.

ΕΤΗ	1	2	3	4	5	6	7
Συντήρηση	1080000	1090800	1101708	1112725,08	1123852,33	1135090,85	1146441,76
Κόστος καυσίμου (φυσικό αέριο	42554784	44682523	46916649,4	49262481,8	51725605,9	54311886,2	57027480,5
Προσωπικό	36000	36360	36723,6	37090,836	37461,7444	37836,3618	38214,7254
Ασφάλεια	410304	414407	418551,11	422736,622	426963,988	431233,628	435545,964
Κόστος ιδίων κεφαλαίων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
Λιπαντικά - Ουρία	1960000	1979600	1999396	2019389,96	2039583,86	2059979,7	2080579,5
Αποσβέσεις	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
Αθροιστικές αποσβέσεις	984729,6	1969459	2954187,6	3938916,6	4923645,6	5908374,6	6893103,6
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΞΟΔΑ</b>	<b>47385817,6</b>	<b>49548420</b>	<b>51817757,7</b>	<b>54199153,9</b>	<b>56698197,4</b>	<b>59320756,4</b>	<b>62072992,1</b>
Έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας	36045206	36045206	39649726,6	39649726,6	43614699,3	43614699,3	47976169,2
Έσοδα θερμικής ενέργειας	7913647	8309329	8724795,82	9161035,61	9619087,39	10100041,8	10605043,8
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ</b>	<b>43958853</b>	<b>44354535</b>	<b>48374522,4</b>	<b>48810762,2</b>	<b>53233786,6</b>	<b>53714741</b>	<b>58581213</b>
<b>ΚΕΡΔΗ</b>	<b>-3426964,60</b>	<b>-5193884</b>	<b>-3443235,3</b>	<b>-5388391,7</b>	<b>-3464410,8</b>	<b>-5606015,3</b>	<b>-3491779</b>

8	9	10	11	12	13	14	15	16
1157906,18	1169485,24	1181180,09	1192991,9	1204921,81	1216971,03	1229140,74	1241432,15	1253846,47
59878854,6	62872797,3	66016437,1	69317259	72783122	76422278	80243392	84255561,5	88468339,6
38596,8727	38982,8414	39372,6698	39766,3965	40164,0605	40565,7011	40971,3581	41381,0717	41794,8824
439901,424	444300,438	448743,442	453230,877	457763,185	462340,817	466964,225	471633,868	476350,206
360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
2101385,29	2122399,14	2143623,13	2165059,37	2186709,96	2208577,06	2230662,83	2252969,46	2275499,15
984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
7877832,6	8862561,6	9847290,6	10832019,6	11816748,6	12801477,6	13786206,6	14770935,6	15755664,6
<b>64961373,9</b>	<b>67992694,5</b>	<b>71174086,1</b>	<b>74513037,1</b>	<b>78017410,6</b>	<b>81695462,3</b>	<b>85555860,7</b>	<b>89607707,7</b>	<b>93860559,9</b>
47976169,2	52773786,1	52773786,1	58051164,7	58051164,7	63856281,2	63856281,2	70241909,3	70241909,3
11135296	11692060,8	12276663,9	12890497,1	13535021,9	14211773	14922361,7	15668479,8	16451903,8
<b>59111465,2</b>	<b>64465846,9</b>	<b>65050450</b>	<b>70941661,8</b>	<b>71586186,6</b>	<b>78068054,2</b>	<b>78778642,9</b>	<b>85910389,1</b>	<b>86693813,1</b>
<b>-5849908,7</b>	<b>-3526847,6</b>	<b>-6123636,1</b>	<b>-3571375,3</b>	<b>-6431223,9</b>	<b>-3627408</b>	<b>-6777217,8</b>	<b>-3697318,6</b>	<b>-7166746,9</b>

17	18	19	20	21	22	23	24	25
1266384,94	1279048,79	1291839,27	1304757,67	1317805,24	1330983,3	1344293,13	1357736,06	1371313,42
92891756,6	97536344,4	102413162	107533820	112910511	118556036	124483838	130708030	137243431
42212,8312	42634,9595	43061,3091	43491,9222	43926,8414	44366,1099	44809,771	45257,8687	45710,4473
481113,708	485924,845	490784,094	495691,935	500648,854	505655,343	510711,896	515819,015	520977,205
360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
2298254,14	2321236,69	2344449,05	2367893,54	2391572,48	2415488,2	2439643,09	2464039,52	2488679,91
984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
16740393,6	17725122,6	18709851,6	19694580,6	20679309,6	21664038,6	22648767,6	23633496,6	24618225,6
<b>98324451,8</b>	<b>103009919</b>	<b>107928025</b>	<b>113090384</b>	<b>118509194</b>	<b>124197259</b>	<b>130168026</b>	<b>136435612</b>	<b>143014842</b>
77266100,2	77266100,2	84992710,3	84992710,3	93491981,3	93491981,3	102841179	102841179	113125297
17274498,9	18138223,9	19045135,1	19997391,8	20997261,4	22047124,5	23149480,7	24306954,8	25522302,5
<b>94540599,2</b>	<b>95404324,1</b>	<b>104037845</b>	<b>104990102</b>	<b>114489243</b>	<b>115539106</b>	<b>125990660</b>	<b>127148134</b>	<b>138647600</b>
<b>-3783852,7</b>	<b>-7605595,2</b>	<b>-3890179,7</b>	<b>-8100282,3</b>	<b>-4019951</b>	<b>-8658153</b>	<b>-4177365,4</b>	<b>-9287477,9</b>	<b>-4367242,2</b>

*Πίνακας 5.9 : Χρηματοροή εγκατάστασης ΜΕΚ (καύσιμο: φυσικό αέριο)*



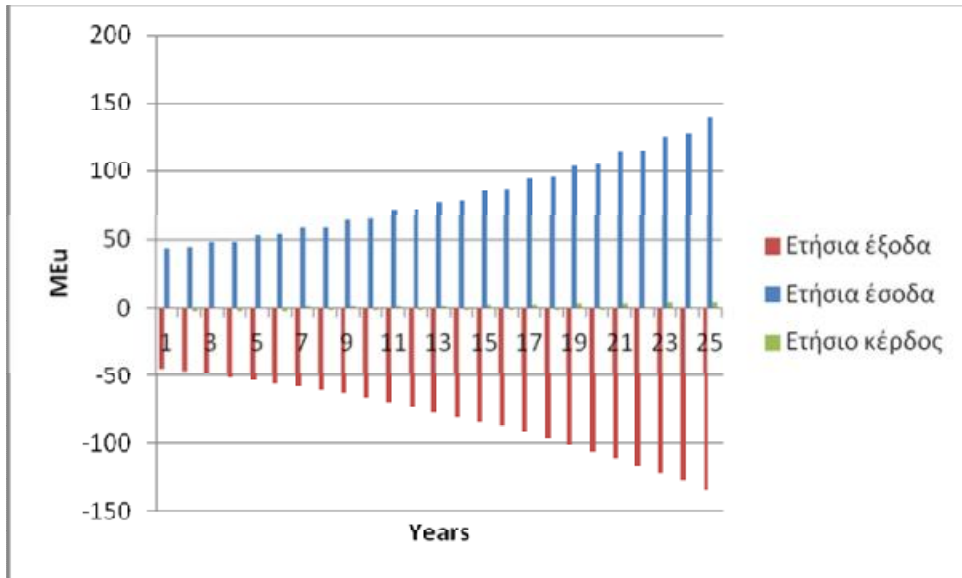
*Διάγραμμα 5.1 : Χρηματοροή εγκατάστασης ΜΕΚ (καύσιμο: φυσικό αέριο)*

ΕΤΗ	1	2	3	4	5	6	7
Συντήρηση	1080000	1090800	1101708	1112725,08	1123852,33	1135090,85	1146441,76
Κόστος καυσίμου (μαζούτ)	39775032	41763784	43851972,8	46044571,4	48346800	50764140	53302347
Προσωπικό	36000	36360	36723,6	37090,836	37461,7444	37836,3618	38214,7254
Ασφάλεια	410304	414407	418551,11	422736,622	426963,988	431233,628	435545,964
Κόστος ιδίων κεφαλαίων	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
Λιπαντικά - Ουρία	1960000	1979600	1999396	2019389,96	2039583,86	2059979,7	2080579,5
Αποσβέσεις	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
Αθροιστικές αποσβέσεις	984729,6	1969459	2954187,6	3938916,6	4923645,6	5908374,6	6893103,6
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΞΟΔΑ</b>	<b>44606065,6</b>	<b>46629680</b>	<b>48753081,1</b>	<b>50981243,5</b>	<b>53319391,5</b>	<b>55773010,1</b>	<b>58347858,5</b>
Εσοδα ηλεκτρικής ενέργειας	36045206	36045206	39649726,6	39649726,6	43614699,3	43614699,3	47976169,2
Εσοδα θερμικής ενέργειας	7913647	8309329	8724795,82	9161035,61	9619087,39	10100041,8	10605043,8
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ</b>	<b>43958853</b>	<b>44354535</b>	<b>48374522,4</b>	<b>48810762,2</b>	<b>53233786,6</b>	<b>53714741</b>	<b>58581213</b>
<b>ΚΕΡΔΗ</b>	<b>-647212,60</b>	<b>-2275145</b>	<b>-378558,67</b>	<b>-2170481,3</b>	<b>-85604,864</b>	<b>-2058269,1</b>	<b>233354,496</b>

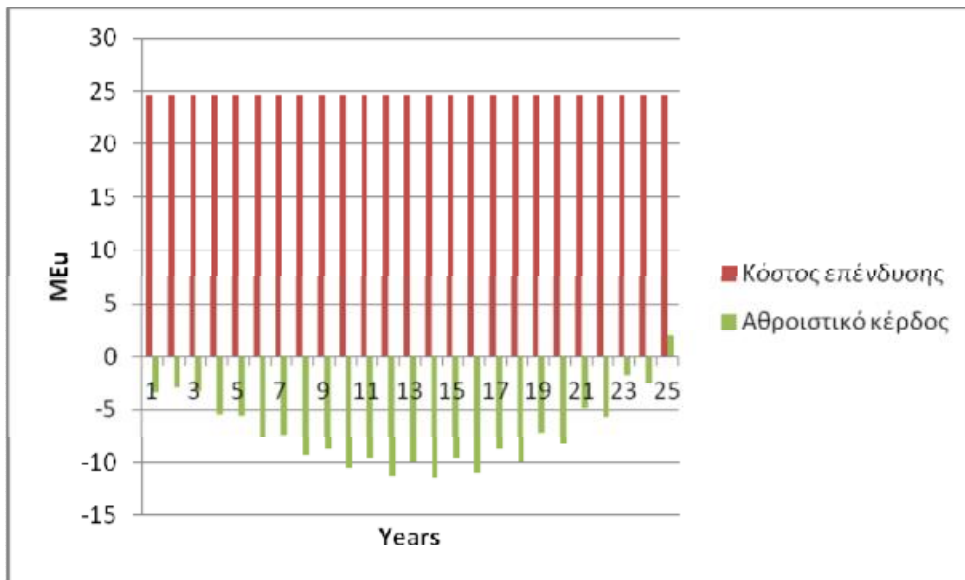
8	9	10	11	12	13	14	15	16
1157906,18	1169485,24	1181180,09	1192991,9	1204921,81	1216971,03	1229140,74	1241432,15	1253846,47
55967464,3	58765837,6	61704129,4	64789335,9	68028802,7	71430242,8	75001755	78751842,7	82689434,9
38596,8727	38982,8414	39372,6698	39766,3965	40164,0605	40565,7011	40971,3581	41381,0717	41794,8824
439901,424	444300,438	448743,442	453230,877	457763,185	462340,817	466964,225	471633,868	476350,206
360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
2101385,29	2122399,14	2143623,13	2165059,37	2186709,96	2208577,06	2230662,83	2252969,46	2275499,15
984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
7877832,6	8862561,6	9847290,6	10832019,6	11816748,6	12801477,6	13786206,6	14770935,6	15755664,6
<b>61049983,7</b>	<b>63885734,8</b>	<b>66861778,4</b>	<b>69985114</b>	<b>73263091,3</b>	<b>76703427</b>	<b>80314223,7</b>	<b>84103988,9</b>	<b>88081655,2</b>
47976169,2	52773786,1	52773786,1	58051164,7	58051164,7	63856281,2	63856281,2	70241909,3	70241909,3
11135296	11692060,8	12276663,9	12890497,1	13535021,9	14211773	14922361,7	15668479,8	16451903,8
<b>59111465,2</b>	<b>64465846,9</b>	<b>65050450</b>	<b>70941661,8</b>	<b>71586186,6</b>	<b>78068054,2</b>	<b>78778642,9</b>	<b>85910389,1</b>	<b>86693813,1</b>
<b>-1938518,5</b>	<b>580112,125</b>	<b>-1811328,4</b>	<b>956547,753</b>	<b>-1676904,7</b>	<b>1364627,17</b>	<b>-1535580,9</b>	<b>1806400,19</b>	<b>-1387842,1</b>

17	18	19	20	21	22	23	24	25
1266384,94	1279048,79	1291839,27	1304757,67	1317805,24	1330983,3	1344293,13	1357736,06	1371313,42
86823906,6	91165101,9	95723357	100509525	105535001	110811751	116352339	122169956	128278453
42212,8312	42634,9595	43061,3091	43491,9222	43926,8414	44366,1099	44809,771	45257,8687	45710,4473
481113,708	485924,845	490784,094	495691,935	500648,854	505655,343	510711,896	515819,015	520977,205
360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000	360000
2298254,14	2321236,69	2344449,05	2367893,54	2391572,48	2415488,2	2439643,09	2464039,52	2488679,91
984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6	984729,6
16740393,6	17725122,6	18709851,6	19694580,6	20679309,6	21664038,6	22648767,6	23633496,6	24618225,6
<b>92256601,8</b>	<b>96638676,8</b>	<b>101238220</b>	<b>106066090</b>	<b>111133684</b>	<b>116452974</b>	<b>122036526</b>	<b>127897538</b>	<b>134049864</b>
77266100,2	77266100,2	84992710,3	84992710,3	93491981,3	93491981,3	102841179	102841179	113125297
17274498,9	18138223,9	19045135,1	19997391,8	20997261,4	22047124,5	23149480,7	24306954,8	25522302,5
<b>94540599,2</b>	<b>95404324,1</b>	<b>104037845</b>	<b>104990102</b>	<b>114489243</b>	<b>115539106</b>	<b>125990660</b>	<b>127148134</b>	<b>138647600</b>
<b>2283997,35</b>	<b>-1234352,7</b>	<b>2799624,98</b>	<b>-1075987,5</b>	<b>3355558,56</b>	<b>-913867,95</b>	<b>3954133,91</b>	<b>-749403,57</b>	<b>4597735,8</b>

Πίνακας 5.10 : Χρηματοροή εγκατάστασης ΜΕΚ (καύσιμο: μαζούτ)



Διάγραμμα 5.2 : Χρηματοροπή εγκατάστασης MEK (καύσιμο: μαζούτ)



Διάγραμμα 5.3 : Απόσβεση κεφαλαίου εγκατάστασης MEK (καύσιμο: μαζούτ)

### 5.3.2 Συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου- ατμοστρόβιλου

ΕΞΟΔΑ		
Κόστος επένδυσης ανά KWh	1000	Eu
Εγκατεστημένη ισχύς	56,25	MW
Αρχικό κόστος επένδυσης	56250000	Eu
Επιδότηση	40%	
Τελικό κόστος επένδυσης	33750000	Eu
Ίδια κεφάλαια	33750000	Eu
Αποσβέσεις (σταθερές) 4%	1350000	Eu/yr
Κόστος ιδίων κεφαλαίων 1,5%	506250	Eu

ΕΞΟΔΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	393750	MWh/yr
Τιμή πώλησης ηλ. ενέργειας	87,85	Eu
Πληθωρισμός	10%	
Ετήσιες πωλήσεις	34590937,5	Eu

ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ		
Κατανάλωση καυσίμου	877333	MWh/yr
Τιμή αγοράς καυσίμου	46	Eu/MWh
Πληθωρισμός	5%	
Ετήσιο κόστος	40357318	Eu

ΕΞΟΔΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		
Παραγωγή θερμικής ενέργειας	392310	MWh/yr
Τιμή αγοράς καυσίμου	0,05	Eu/KWh
Πληθωρισμός	5%	
Ετήσιες πωλήσεις	19615500,00	Eu

ΣΤΑΘΕΡΟ ΚΟΣΤΟΣ			
*Συντήρηση			491670 Eu/yr
Πληθωρισμός	1%		
*Μισθοί (Επιδότηση 40%)	36000	Eu/yr	
Πληθωρισμός	1%		
*Ασφάλεια	478125	Eu/yr	
Πληθωρισμός	1%		
*Λιπαντικά			302000 Eu/yr
*Ουρία	1,54	Eu/yr	616000 Eu/yr
		<b>Total :</b>	1923795 Eu/yr

**Πίνακας 5.11 : Υπολογισμός εσόδων/εξόδων για μονάδα συνδυασμένου κύκλου**

Στον Πίνακα 5.11 φαίνονται οι υπολογισμοί των εσόδων και εξόδων της μονάδας συνδυασμένου κύκλου ώστε να προκύψει η χρηματοροπή του έργου για τη διάρκεια των 25 ετών. Από στοιχεία που λάβαμε από την εταιρεία Siemens το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται προσεγγιστικά στα 1000 Eu/KWh . Δεδομένης της ισχύς του

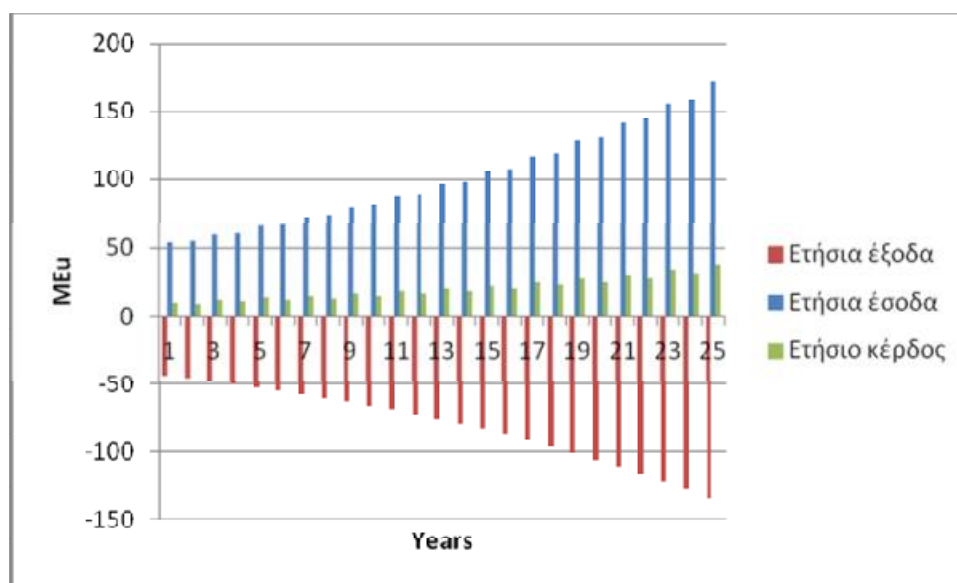
συστήματος αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου (56,25 MW) το κόστος επένδυσης ανέρχεται στα 56,25 ΜΕυ. Από την παράγραφο 5.2.4.2.3 προκύπτει κρατική επιδότηση 40% επί του συγκεκριμένου ποσού. Επίσης υπολογίζονται τα έξοδα καυσίμου, συντήρησης κ.λπ. καθώς και τα έσοδα θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, όλα με τον ανάλογο πληθωρισμό.

ΕΤΗ	1	2	3	4	5	6	7
Συντήρηση	491670	496586,7	501552,567	506568,093	511633,774	516750,111	521917,612
Κόστος καυσίμου (φυσικό αέριο)	40357318	42375184	44493943,1	46718640,2	49054572,3	51507300,9	54082665,9
Προσωπικό	36000	36360	36723,6	37090,836	37461,7444	37836,3618	38214,7254
Ασφάλεια	478125	482906,3	487735,313	492612,666	497538,792	502514,18	507539,322
Κόστος ιδίων κεφαλαίων	430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312
Διπανά - Ουρία	918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000
Αποσβέσεις	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000
Αθροιστικές αποσβέσεις	1350000	2497500	3645000	4792500	5940000	7087500	8235000
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΞΟΔΑ</b>	<b>44061425</b>	<b>46089349</b>	<b>48218266,6</b>	<b>50453223,8</b>	<b>52799518,6</b>	<b>55262713,5</b>	<b>57848649,6</b>
Έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας	34590938	34590938	38050031,8	38050031,8	41855035	41855035	46040538,5
Έσοδα θερμικής ενέργειας	19615500	20596275	21626088,8	22707393,2	23842762,8	25034901	26286646
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΕΣΟΔΑ</b>	<b>54206438</b>	<b>55187213</b>	<b>59676120,6</b>	<b>60757425</b>	<b>65697797,8</b>	<b>66889936</b>	<b>72327184,5</b>
<b>ΚΕΡΑΗ</b>	<b>10145013,00</b>	<b>9097864</b>	<b>11457854</b>	<b>10304201,1</b>	<b>12898279,3</b>	<b>11627222,4</b>	<b>14478534,9</b>

8	9	10	11	12	13	14	15	16
527136,789	532408,156	537732,238	543109,56	548540,656	554026,063	559566,323	565161,986	570813,606
56786799,2	59626139,2	62607446,1	65737818,4	69024709,4	72475944,8	76099742,1	79904729,2	83899965,6
38596,8727	38982,8414	39372,6698	39766,3965	40164,0605	40565,7011	40971,3581	41381,0717	41794,8824
512614,715	517740,862	522918,271	528147,454	533428,928	538763,218	544150,85	549592,358	555088,282
430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312
918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000
1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000
9382500	10530000	11677500	12825000	13972500	15120000	16267500	17415000	18562500
<b>60563459,6</b>	<b>63413583</b>	<b>66405781,3</b>	<b>69547153,9</b>	<b>72845155</b>	<b>76307611,8</b>	<b>79942742,6</b>	<b>83759176,6</b>	<b>87765974,4</b>
46040538,5	50644592,3	50644592,3	55709051,6	55709051,6	61279956,7	61279956,7	67407952,4	67407952,4
27600978,3	28981027,3	30430078,6	31951582,6	33549161,7	35226619,8	36987950,8	38837348,3	40779215,7
<b>73641516,8</b>	<b>79625619,6</b>	<b>81074670,9</b>	<b>87660634,1</b>	<b>89258213,2</b>	<b>96506576,5</b>	<b>98267907,5</b>	<b>106245301</b>	<b>108187168</b>
<b>13078057,2</b>	<b>16212036,5</b>	<b>14668889,6</b>	<b>18113480,3</b>	<b>16413058,2</b>	<b>20198964,7</b>	<b>18325164,9</b>	<b>22486124,1</b>	<b>20421193,7</b>

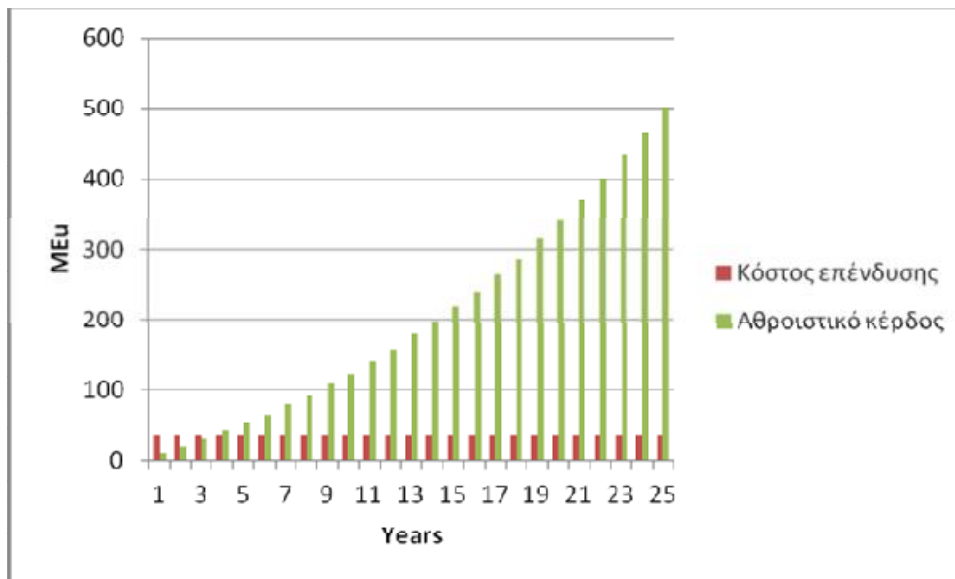
17	18	19	20	21	22	23	24	25
576521,742	582286,96	588109,8294	593990,928	599930,837	605930,145	611989,447	618109,341	624290,435
88094963,9	92499712,1	97124697,72	101980933	107079979	112433978	118055677	123958461	130156384
42212,8312	42634,9595	43061,30912	43491,9222	43926,8414	44366,1099	44809,771	45257,8687	45710,4473
560639,165	566245,556	571908,0118	577627,092	583403,363	589237,396	595129,77	601081,068	607091,879
430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312	430312
918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000	918000
1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000	1350000
19710000	20857500	22005000	23152500	24300000	25447500	26595000	27742500	28890000
<b>91972649,7</b>	<b>96389191,6</b>	<b>101026088,9</b>	<b>105894355</b>	<b>111005552</b>	<b>116371824</b>	<b>122005918</b>	<b>127921221</b>	<b>134131789</b>
74148747,6	74148747,6	81563622,39	81563622,4	89719984,6	89719984,6	98691983,1	98691983,1	108561181
42818176,5	44959085,3	47207039,58	49567391,6	52045761,1	54648049,2	57380451,7	60249474,2	63261947,9
<b>116966924</b>	<b>119107833</b>	<b>128770662</b>	<b>131131014</b>	<b>141765746</b>	<b>144368034</b>	<b>156072435</b>	<b>158941457</b>	<b>171823129</b>
<b>24994274,5</b>	<b>22718641,3</b>	<b>27744573,1</b>	<b>25236659,4</b>	<b>30760193,5</b>	<b>27996210</b>	<b>34066516,6</b>	<b>31020236,1</b>	<b>37691340,6</b>

*Πίνακας 5.12 : Χρηματοροή εγκατάστασης συνδυσμένου κύκλου*



*Διάγραμμα 5.4 : Χρηματοροή εγκατάστασης συνδυσμένου κύκλου*





Διάγραμμα 5.5 : Απόσβεση κεφαλαίου εγκατάστασης συνδυασμένου κύκλου

## 5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο 5 της Πτυχιακής εργασίας αναλύθηκαν τα οικονομικά στοιχεία μιας εγκατάστασης μονάδας 50 MW σε λειτουργία συμπαραγωγής για διαφορετικές τεχνολογίες.

Βάσει των αποτελεσμάτων στους παραπάνω Πίνακες και Διαγράμματα διαπιστώνουμε πως η κάλυψη των φορτίων με MEK είναι τελικά μια μη βιώσιμη επιλογή. Ο μεγάλος λόγος ηλεκτρισμού-θερμοτητάς δεν μας επιτρέπει να ανακτήσουμε τα ποσά θερμότητας που καταφέρνουμε στη μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδας MEK ανέρχεται στο 60-62%, τιμή αρκετά χαμηλότερη από τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Αυτό αντικατοπτρίζεται στα διαγράμματα, όπου παρατηρούμε πως η επένδυση είναι ζημιογόνα τόσο για καύσιμο φυσικό αέριο όσο και για μαζούτ. Παρατηρούμε στο Διάγραμμα 5.3, πως χρησιμοποιώντας μαζούτ το κέρδος ξεκινάει τον 25<sup>ο</sup> χρόνο λειτουργίας αλλά παρόλα αυτά δεν καλύπτει το κόστος επένδυσης.

Αντίθετα, επιλέγοντας μονάδα συνδυασμένου κύκλου τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται στο 45% . Λόγω της χρήσης ατμοστρόβιλου αντίθλιψης στην έξοδο του στροβίλου

μπορούμε να ανακτήσουμε μεγάλα ποσά θερμότητας για περαιτέρω χρήση, γεγονός που μας δίνει λόγο ηλεκτρισμού-θερμότητας κοντά στο 1. Η εγκατάσταση έχει ολικό βαθμό απόδοσης 90%. Φυσικά, το ποσό των 392000 MWh θερμικής ενέργειας είναι ένα ποσό δύσκολο να διαχειριστεί για να δεδομένα της περιοχής και η εξ' ολοκλήρου πώλησή του είναι ένα θέμα που θα πρέπει να εξασφαλισθεί. Στο Διάγραμμα 5.4 παρατηρούμε πως η εγκατάσταση αποδίδει κέρδος από το πρώτο έτος λειτουργίας της. Στο Διάγραμμα 5.5 παρατηρούμε πως μετά από τέσσερα χρόνια λειτουργίας η επένδυση θα αποφέρει καθαρά κέρδη, έχοντας αποσβέσει ολόκληρο το κόστος εγκατάστασης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο πως η επιλογή που θα ακολουθήσουμε είναι μονάδα συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου-ατμοστρόβιλου με αντίθλιψη για αξιοποίηση του ατμού στην έξοδο του ατμοστρόβιλου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί*, Ε. Κακαράς, Εκδ. Φούντα, 2003
2. *Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί*, Η. Κροντήρης, Εκδ. Ιων, 1994
3. *Λειτουργία αεριοστρόβιλων και ατμοστρόβιλων*, Κ. Μαθιουδάκης, Εκδ. ΕΜΠ
4. *Αρχές εμβολοφόρων ΜΕΚ*, Κ. Ρακόπουλος, Εκδ. Φούντα, 1998
5. *Ενεργειακές πρώτες ύλες*, Μ. Σταματάκης, Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας
6. *Οικονομική ανάλυση ενεργειακών συστημάτων (Σημειώσεις μαθήματος)*, Α. Παπαδόπουλος, Εκδ. ΑΠΘ
7. *Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία (Παρουσίαση)*, Ν. Μαμάσης – Ι. Στεφανάκος, ΕΜΠ, 2011
8. *Οδηγός συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας*, ΚΑΠΕ
9. *Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από πλευράς οικονομικής και περιβαλλοντικής απόδοσης*, Α. Ευθυμιάδης-Ε. Βιρβίλη-Γ. Πορφύρης, Διημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα 9-10 Ιουνίου 2005
10. *Μελέτη συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης και το νοσοκομείο ΑΧΕΠΑ (Διπλωματική εργασία)*, Ε. Λουκαδοπούλου, 2009
11. *Υπολογιστική μοντελοποίηση δράσεων για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ορυκτών καυσίμων (Διπλωματική εργασία)*, Ε. Κλάδος
12. *EDUCOGEN The European educational tool on cogeneration*, Χ. Fragkopoulos, NTUA, 2001
13. *Transient simulation of a combined cycle trigeneration system fuelled by natural gas*, Ο. Zogou, Msc thesis, University of Thessaly, 2007
14. *Combined cycle heat recovery optimization*, A Rangeland, International joint power generation conference, Miami FL, 2000


15. *Industrial and commercial cogeneration*, John H. Gibbons, 1983
16. *Power plants: characteristics and costs*, Stan Kaplan, Congressional Research Service, 2008


### **Δικτυακοί τόποι**


1. [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
2. [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
3. [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
4. [www.depa.gr](http://www.depa.gr)
5. [www.hachp.gr](http://www.hachp.gr)
6. [www.cogen.org](http://www.cogen.org)
7. [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)
8. [www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com)
9. <http://sfrang.com/historia/selida604.htm#1>
10. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Τιμολόγια φυσικού αερίου


		ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ					
		ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ:					
		T1 (Μαγειρέμα / Ζεστό νερό)					
		T2 (Αυτόνομη / Ανεξάρτητη θέρμανση)					
		T3 (Επαγγελματική χρήση/ Κεντρική θέρμανση) - χωρίς πάγια χρέωση					
		T3C (Συμπαράγωγη) - χωρίς πάγια χρέωση					
		T3D (Κλιματισμός) - χωρίς πάγια χρέωση					
ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΤΕΛΟΣ		T1	T2	T3	T3C	T3D	ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ
		€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	kwh/Nm3
2012	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0,071370507	0,060286735	0,061889208	0,058794748	0,061889208	11,2054
	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0,069489470	0,058405698	0,060008171	0,057007762	0,060008171	11,2134
	ΜΑΡΤΙΟΣ	0,069395411	0,058311639	0,059914112	0,056918406	0,059914112	11,2079
	ΑΠΡΙΛΙΟΣ						
	ΜΑΙΟΣ						
	ΙΟΥΝΙΟΣ						
	ΙΟΥΛΙΟΣ						
	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ						
	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ						
	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ						
	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ						
	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ						

		ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ					
		ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ:					
		T1 (Μαγειρέμα / Ζεστό νερό)					
		T2 (Αυτόνομη / Ανεξάρτητη θέρμανση)					
		T3 (Επαγγελματική χρήση/ Κεντρική θέρμανση) - χωρίς πάγια χρέωση					
		T3C (Συμπαράγωγη) - χωρίς πάγια χρέωση					
		T3D (Κλιματισμός) - χωρίς πάγια χρέωση					
ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΤΕΛΟΣ		T1	T2	T3	T3C	T3D	ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ
		€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	kwh/Nm3
2011	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0,059424190	0,048788717	0,050307558	0,047792178	0,050307558	11,1809
	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0,058843844	0,048188371	0,049727210	0,047240850	0,049727210	11,1909
	ΜΑΡΤΙΟΣ	0,058579258	0,047921783	0,049482822	0,046989491	0,049482822	11,1959
	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0,057053282	0,046395809	0,047938848	0,045539818	0,047938848	11,2010
	ΜΑΙΟΣ	0,061022509	0,050365038	0,051905875	0,044119994	0,044119994	11,2192
	ΙΟΥΝΙΟΣ						
	ΙΟΥΛΙΟΣ						
	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ						
	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ						
	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ						
	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ						
	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ						

		ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ					
		ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ:					
		T1 (Μαγείρεμα / Ζεστό νερό)					
		T2 (Αυτόνομη / Ανεξάρτητη θέρμανση)					
		T3 (Επαγγελματική χρήση/ Κεντρική θέρμανση) - χωρίς πάγια χρέωση					
ΤΙΜΕΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΤΕΛΟΣ		T1	T2	T3	T3C	T3D	ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ
		€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	€/Kwh	kwh/Nm3
2010	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0.051690226	0.041540252	0.043007718	0.040857332	0.043007718	11.1729
	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0.054593107	0.044443133	0.045910599	0.043615069	0.045910599	11.1829
	ΜΑΡΤΙΟΣ	0.054999487	0.044849513	0.046316979	0.044001130	0.046316979	11.2137
	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0.054844870	0.044694896	0.046162362	0.043854244	0.046162362	11.2162
	ΜΑΙΟΣ	0.057286306	0.047136332	0.048603798	0.041313228	0.041313228	11.1917
	ΙΟΥΝΙΟΣ	0.061485891	0.051335917	0.052803383	0.044882876	0.044882876	11.1929
	ΙΟΥΛΙΟΣ	0.060746686	0.050596712	0.052064178	0.044254551	0.044254551	11.2398
	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	0.060175324	0.050025350	0.051492816	0.043768894	0.043768894	11.2491
	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	0.063803791	0.053653817	0.055121283	0.046853091	0.046853091	11.2534
	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	0.058986708	0.048836734	0.050304200	0.047788990	0.050304200	11.2461
	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	0.056168241	0.046018267	0.047485733	0.045111446	0.047485733	11.2009
	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	0.058560848	0.048410874	0.049878340	0.047384423	0.049878340	11.1926

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδυασμένου κύκλου και ΜΕΚ

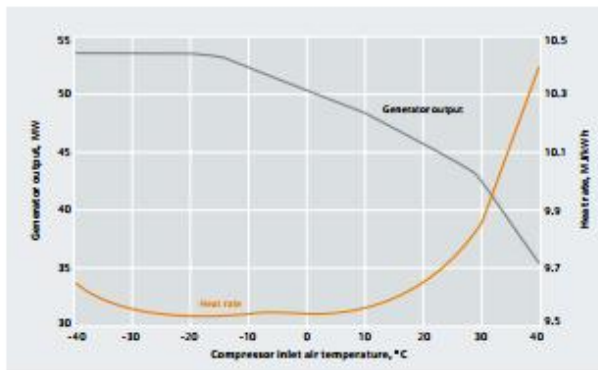
### SGT-800 Industrial Gas Turbine



#### Technical specifications

<b>Overview</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Power generation: 47.0MW(e)</li><li>• Frequency: 50/60Hz</li><li>• Electrical efficiency: 37.5%</li><li>• Heat rate: 9,597kJ/kWh (9,096 Btu/kWh)</li><li>• Turbine speed: 6,608 rpm</li><li>• Compressor pressure ratio: 19.9:1</li><li>• Exhaust gas flow: 131.5 kg/s (289.9 lb/s)</li><li>• Exhaust temperature: 544°C (1,011°F)</li><li>• NO<sub>x</sub> emissions:<ul style="list-style-type: none"><li>- (with DLE corrected to 15% O<sub>2</sub> dry)</li><li>- Natural gas: ≤15ppmV</li><li>- Liquid fuel: ≤42ppmV</li></ul></li></ul>	<b>Fuel System</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Natural gas – Liquid fuel – Dual fuel</li><li>• On-load fuel changeover capability</li><li>• Load-rejection capability</li><li>• Gas-supply pressure requirement: 27-30 bar(a) (390-435 psi(a))</li></ul>
<b>Axial Compressor</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 15-stage axial-flow compressor<ul style="list-style-type: none"><li>- 3 stages variable guide vanes</li></ul></li><li>• Electron-beam welded rotor</li><li>• Cr-steel blades and vanes</li><li>• Abradable seals</li><li>• Controlled Diffusion Airfoils</li></ul>	<b>Speed Reduction Gearbox</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Double helical design</li><li>• Cold-end-driven generator</li><li>• Speeds of 1,500 rpm and 1,800 rpm to suit 50 Hz or 60 Hz operation</li></ul>
<b>Combustion</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 30 dual-fuel Dry Low Emissions burners</li><li>• Welded annular sheet metal design</li><li>• Thermal-barrier-coated inner surface</li></ul>	<b>Generator</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Four-pole design</li><li>• Rated voltage: 10.5 kV/11.0 kV/13.8 kV</li><li>• 50 Hz or 60 Hz</li><li>• Protection IP54</li><li>• PMG for excitation power supply</li><li>• Complies with IEC/EN 6034-1 standard</li></ul>
<b>Turbine</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Single-module high-efficiency 3-stage turbine<ul style="list-style-type: none"><li>- two first stages and stator flanges are air-cooled</li><li>- first stage of single-crystal material</li><li>- third stage with interlocking shrouds</li></ul></li></ul>	<b>Lubrication</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Lubricating oil system placed on separate skid</li><li>• 3 x 50% AC-driven lube oil pumps with DC backup</li></ul>
<b>Bearings</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Tilting-pad radial and thrust bearings</li><li>• Vibration and temperature monitoring</li></ul>	<b>Starting</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Electric start-motor connected to gearbox</li></ul>
	<b>Control System</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Siemens Simatic control system</li><li>• Distributed Inputs/Outputs</li></ul>
	<b>Other</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Straight axial exhaust</li></ul>

## SGT-800 Performance



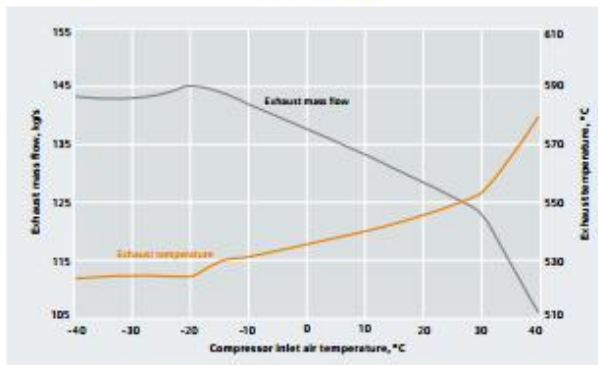
### Nominal generator output and heat rate

#### Conditions/assumptions:

Fuel: Natural Gas LHV, 46,798 kJ/kg (20,118 Btu/lb)  
 Altitude: Sea level  
 Ambient pressure: 1.013bar(a) (14.7psi(a))  
 Relative humidity: 60 %  
 Inlet pressure loss: 5 mbar (2" H<sub>2</sub>O)  
 Outlet pressure loss: 5 mbar (2" H<sub>2</sub>O)  
 Fuel temperature: 5°C (41°F)

#### Diagram conversion factors:

To convert	To	Multiply by
°C	°F	(°C x 9/5) + 32
MJ/kWh	Btu/kWh	949



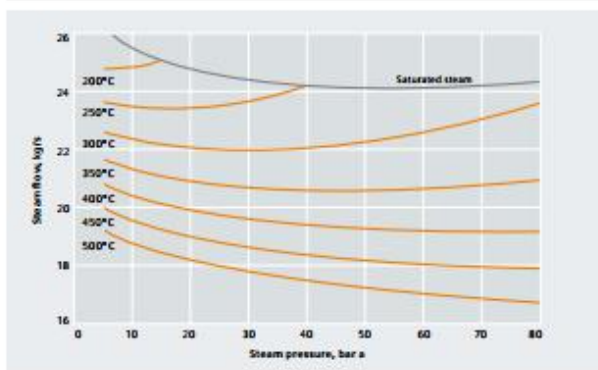
### Nominal exhaust mass flow and temperature

#### Conditions/assumptions:

Fuel: Natural Gas LHV, 46,798 kJ/kg (20,118 Btu/lb)  
 Altitude: Sea level  
 Ambient pressure: 1.013bar(a) (14.7psi(a))  
 Relative humidity: 60 %  
 Inlet pressure loss: 5 mbar (2" H<sub>2</sub>O)  
 Outlet pressure loss: 5 mbar (2" H<sub>2</sub>O)  
 Fuel temperature: 5°C (41°F)

#### Diagram conversion factors:

To convert	To	Multiply by
°C	°F	(°C x 9/5) + 32



### Unfired heat-recovery steam generation

#### Conditions/assumptions:

Fuel: Natural Gas LHV, 46,798 kJ/kg (20,118 Btu/lb)  
 Altitude: Sea level  
 Ambient pressure: 1.013bar(a) (14.7psi(a))  
 Ambient temperature: 15°C (59°F)  
 Relative humidity: 60 %  
 Boiler pinch point: 8K (14F)  
 Boiler approach point: 5K (9F)  
 Inlet pressure loss: 5 mbar (2" H<sub>2</sub>O)  
 Outlet pressure loss: 25 mbar (10" H<sub>2</sub>O)

#### Diagram conversion factors:

To convert	To	Multiply by
°C	°F	(°C x 9/5) + 32
kg/s	lb/s	2.2046
bar	psi	14.5





## SST-150

### up to 20 MW

The SST-150 is a single-casing turbine, providing geared drive to a 1,500 or 1,800 rpm generator and packaged in a skid-mounted design. For power generation, it provides high efficiency together with a very compact arrangement.

### Technical data

---

- Power output up to 20 MW
- Inlet pressure up to 103 bar/1,495 psi
- Inlet steam temperature up to 505°C/940°F
- Rotational speed up to 13,300 rpm
- Bleed up to 25 bar/365 psi
- Controlled extraction up to 16 bar/230 psi
- Exhaust pressure (back pressure) up to 10 bar/145 psi
- Exhaust pressure (condensing) up to 0.25 bar/3.6 psi
- Exhaust area 0.28 – 1.6 m<sup>2</sup>/3.0 – 17.2 sq. ft.

### Typical dimensions

---

Length 12 m/39 ft.  
Width 4 m/13.1 ft.  
Height 5 m/16.4 ft.

### Features

---

- Back pressure /condensing type
- Package unit design
- Pre-engineered turbine modules, modular peripherals
- Single controlled extraction
- Radial exhaust
- Separated oil and steam piping

## Wärtsilä 46

Technical data 50 Hz/500 rpm		Unit	12V46*	18V46*	20V46F/600 rpm
Power, electrical		kW	11384	17076	22425
Heat rate		kJ/kWh	7732	7732	7695
Electrical efficiency		%	46.6	46.6	46.8
Technical data 60 Hz/514 rpm			600 rpm		
Power, electrical		kW	11384	17076	22425
Heat rate		kJ/kWh	7732	7732	7695
Electrical efficiency		%	46.6	46.6	46.8
Dimensions and dry weight of generating set					
Length		mm	15400	18780	21410
Width		mm	5090	5320	6275
Height		mm	5700	6020	6230
Weight		tonne	265	358	414

Heat rate and electrical efficiency at generator terminals, including engine-driven pumps. ISO 3046 conditions and LHV. Tolerance 5%. Power factor 0.8.

\* Gas diesel version available.