



Π.Μ.Σ.: MASTER OF SCIENCE IN OIL AND GAS PROCESS SYSTEM  
ENGINEERING

MSC ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Gas Turbine conceptual analysis of a cogeneration system, , with a Heat Recovery  
Steam Generation.

Ανάλυση συστήματος συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και μονάδα ανάκτησης  
θερμότητας καυσαερίων.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

ΣΑΜΠΙΑΝΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΜΕ Α.Μ.:20190015

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

«ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ»

ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΛΕΨΗ ΤΟΥ κ. ΣΤΕΦΑΝΑΚΗ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

**ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**Δρ Αιμιλία Κονδύλη, Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

(Όνομα)

(Υπογραφή)

**Δρ Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Αντιπρύτανης Έρευνας & Δια Βίου Εκπαίδευσης,  
Πα.Δ.Α.**

(Όνομα)

(Υπογραφή)

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σαμπάνης Νικόλαος του Στέφανου, με αριθμό μητρώου 20190015 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου» του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Σαμπάνης Νικόλαος



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να μελετήσουμε ένα σύστημα συμπαραγωγής και να αναλύσουμε τα επιμέρους στοιχεία που την αποτελούν.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση των συστημάτων αυτών λόγω των ευκολιών που παρέχει και λόγω του ότι είναι φιλικό προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα μελετήσουμε την εγκατάσταση αεριοστροβίλου. Θα αναλύσουμε τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα αεριοστρόβιλο και θα γνωρίσουμε τα επιμέρους εξαρτήματά τους. Επίσης θα δούμε τους θερμοδυναμικούς νόμους που εφαρμόζονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα δούμε και θα εξηγήσουμε τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στο χώρο καύσης ενός αεριοστροβίλου καθώς και τους περιορισμούς τους οποίους έχουμε.

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι που έχει το συγκεκριμένο σύστημα, είναι η μονάδα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων (HRSG). Θα δούμε και θα αναλύσουμε πως η ενέργεια που περιέχεται στα καυσαέρια, αντί να φύγει στο περιβάλλον σαν θερμότητα, μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε προς όφελος μας.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονάδα ανάκτησης θερμότητας, κύκλος BRAYTON, αεριοστρόβιλος, φυσικό αέριο, θερμότητα, θερμοκρασία καύσης, μεταφορά θερμότητας, εναλλάκτες.

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την απεριόριστη βοήθεια που είχα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, στην οικογένεια μου, στους συνάδελφους μου στη δουλειά μου, που με τις γνώσεις τους με βοήθησαν σε δύσκολα προβλήματα, στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Στεφανάκη Αθανάσιο, που από την αρχή αυτής της διαδρομής, στάθηκε δίπλα μου, με βοήθησε πάρα πολύ να θυμηθώ και να κατανοήσω όλες τις διαδικασίες που έπρεπε να επιλύσω.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου στις μονάδες που με στήριξαν με τον τρόπο τους ούτως ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω αυτό το μεταπτυχιακό.

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ΠΡΟΣ ΧΟΡΗΓΟΥΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους χορηγούς του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Βιομηχανικά Συστήματα Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου». ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε., Δήμος Ασπροπύργου και Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για την χρηματοδότηση και την υποστήριξη που μας παρείχαν, ούτως ώστε να μπορέσουμε να παρακολουθήσουμε και να αποφοιτήσουμε από το συγκεκριμένο μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

## Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ΠΡΟΣ ΧΟΡΗΓΟΥΣ .....	5
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	8
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	9
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	10
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....	10
Α. ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	10
Β. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	11
ΣΚΟΠΟΣ.....	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-1. Θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστρόβιλου. ....	17
1.1 Θερμοδυναμική. ....	17
1.2 Κύκλος BRAYTON. Ο ιδανικός κύκλος αεριοστρόβιλων. ....	19
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-2. Συμπαραγωγή (Combined Heat and Power, CHP). ....	22
2.1 Αρχή λειτουργίας της ΣΗΘ. ....	22
2.2 Τεχνολογίες και συστήματα ΣΗΘ. ....	24
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μονάδων ΣΗΘ.....	25
2.4 Διαθεσιμότητα καυσίμου.....	27
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-3. Εκπομπές CO <sub>2</sub> και τρόποι αντιμετώπισης.....	29
3.1 Γενικά.....	29
3.2 Διαμόρφωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. ....	32
3.3 Ένταση άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή. ....	34
3.4 Τρόποι αντιμετώπισης εκπομπών άνθρακα.....	37
3.4.1 Γενικά.....	37
3.5 Διαδικασία λειτουργίας CCUS.....	39
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-4. Αεριοστρόβιλος.....	41
4.1 Αρχή λειτουργίας αεριοστρόβιλου. ....	41
4.2 Τα κύρια εξαρτήματα των αεροστροβίλων. ....	43
4.2.1 Σύστημα εισαγωγής. ....	44
4.2.2 Συμπιεστής. ....	44
4.2.3 Θάλαμος καύσης. ....	47

4.2.4	Στρόβιλος.....	48
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-5. Γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (HRSG UNIT).....	51
5.1	Τι είναι η HRSG;.....	51
5.2	Κατηγορίες γεννητριών ανάκτησης θερμότητας.....	53
5.2.1	Μονάδα ανάκτησης θερμότητας με καύση.....	53
5.2.2	Κάθετοι και οριζόντιοι τύποι.....	54
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-6. Καύσιμα.....	56
6.1	Φυσικό αέριο.....	56
6.2	Χρήσεις φυσικού αερίου.....	56
6.3	Πλεονεκτήματα.....	57
6.4	Μειονεκτήματα.....	58
6.5	Σύσταση φυσικού αερίου.....	59
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	62
7.1	ΠΙΕΣΗ-ΣΥΜΠΙΕΣΗ-ΕΚΤΟΝΩΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ.....	64
7.1.1	Συμπίεστής.....	64
7.1.2	Θάλαμος καύσης.....	66
7.1.3	Εκτόνωση καυσαερίων.....	70
7.2	Υπολογισμός εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO <sub>2</sub> .....	72
7.3	Θερμική απόδοση κύκλου BRAYTON.....	74
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-8. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΤΜΟΥ.....	75
8.1	Εισαγωγή.....	75
8.2	Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων – θερμική ισχύς.....	78
8.2.1	Παραδοχές.....	78
8.2.2	Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων.....	79
8.2.3	Συνολική ενέργεια που απορροφάτε από τον εξατμιστή και υπερθερμαντήρα. 79	
8.2.4	Υπολογισμός παραγόμενου ατμού.....	80
8.2.5	Θερμότητά από απορροφά ο υπερθερμαντήρας ατμού.....	80
8.2.6	Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του υπερθερμαντήρα..	80
8.2.7	Ενέργεια που απορροφάτε στον εξατμιστή.....	82
8.2.8	Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων μετά τον οικονομητήρα.....	83
8.3	Ενεργειακό ισοζύγιο HRSG.....	85
8.4	Θερμική απόδοση του συστήματος ανάκτησης θερμότητας HRSG.....	86
9	ΚΕΦΑΛΑΙΟ-9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	88
9.1	Συμπέρασμα 1.....	88

9.2	Συμπέρασμα 2 .....	89
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	93
	Υπολογισμοί αεριοστροβίλου 62 MW .....	93
	Υπολογισμός παραγομένου ατμού για 62 MW .....	94
	Υπολογισμοί για αεριοστροβίλο 33 MW.....	95
	..... <b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>	
	Υπολογισμός ατμού για διπλό αεριοστροβίλο 2*33MW.....	96
	Σχεδιάγραμμα διάταξης μονάδας.....	97
	Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων/νερού.....	98

### ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1.	Διάγραμμα 2 <sup>ο</sup> θερμοδυναμικού νόμου.....	18
Σχήμα 1-2.	Διάγραμμα 2 <sup>ο</sup> θερμοδυναμικού νόμου.....	18
Σχήμα 1-3.	Κλειστός κύκλος BRAYTON .....	19
Σχήμα 1-4.	Διαγράμματα κύκλου BRAYTON (Μανωλάκος, χ.χ.) .....	20
Σχήμα 2-1	Αρχή μονάδας ΣΗΘ. (Woodford, 1).....	23
Σχήμα 2-2	Απόδοση χωριστής και συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. (IEA, 2008).....	23
Σχήμα 4-1.	Αεριοπαραγωγός (Πολυζάκης, 2017).....	43
Σχήμα 4-2.	Αεριοπαραγωγός (Πολυζάκης, 2017).....	43
Σχήμα 4-3.	Τομή αεριοστροβίλου. (Valadis, 2015) .....	44
Σχήμα 4-4.	Φυγοκεντρικός συμπιεστής. (Πολυζάκης, 2017) .....	45
Σχήμα 4-5.	Τομή αξονικού πολυβάθμιου συμπιεστή. Α: εμπρός τμήμα στάτορα συμπιεστή, Β: πίσω τμήμα στάτορα συμπιεστή, Γ: τμήμα κεντρικού δομικού εξαρτήματος, Δ: πίσω πλαίσιο συμπιεστή, Ε: στροφέιο συμπιεστή, ΣΤ: εμπρός πλαίσιο συμπιεστή. (Πολυζάκης, 2017) .....	46
Σχήμα 5-1.	Διάγραμμα γεννήτριας ατμού. (Kim, 2014).....	51
Σχήμα 5-2.	Μονάδα HRSG (SUBBARAO, n.d.).....	52
Σχήμα 5-3.	Διάταξη μονάδων HRSG (Roumeliotis, 2012).....	54
Σχήμα 7-1.	Διάγραμμα μεγεθών ενός αεριοστροβίλου.....	63
Σχήμα 7-2.	Διάγραμμα πολυτροπικού βαθμού απόδοσης.....	64
Σχήμα 7-3.	Απεικόνιση κύκλου Brayton.....	74
Σχήμα 8-1.	Διάγραμμα μονάδας ανάκτησης θερμότητας. (Rackley, 2017).....	75
Σχήμα 8-2.	Προσδιορισμός PP. (Yousri M. A. Welaya, 2013).....	76
Σχήμα 8-3.	Προσδιορισμός σημείου AP. (Meseret Nasir Reshid, 2016).....	77
Σχήμα 8-4.	Σχηματική απεικόνιση HRSG .....	78
Σχήμα 8-5.	Ενεργειακό ισοζύγιο μονάδας .....	87
Σχήμα 10-1.	Διάγραμμα μονάδας .....	97



## ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 8-1. Θερμοκρασιακή κατανομή υπερθερμαντήρα. ....	81
Διάγραμμα 8-2. Θερμοκρασιακή κατανομή εξατμιστή.....	82
Διάγραμμα 8-3. Θερμοκρασιακή κατανομή οικονομητήρα. ....	84
Διάγραμμα 10-1. Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων/νερού.....	98

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1. Εισαγωγή ενεργειακών προϊόντων 2016 - Ιούνιος 2020. (Μηνιαία μέση τιμή). (Antonenko, 2020).....	27
Εικόνα 2-2. Κατανομή ενεργειακών προϊόντων 2019- πρώτο μισό 2020. (Antonenko, 2020).....	28
Εικόνα 2-3. Εισαγωγή φυσικού αερίου από διάφορες χώρες. 2019 – πρώτο μισό 2020. (Antonenko, 2020).....	28
Εικόνα 3-1. Παγκοσμια καταναλωση ορυκτων καυσιμων. (Dr. Max Roser, n.d.).....	29
Εικόνα 3-2. Παγκοσμια καταναλωση κασιμων. (Dr. Max Roser, χ.χ.).....	30
Εικόνα 3-3. Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. (IEA, n.d.).....	30
Εικόνα 3-4. Διαμόρφωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας βάση καυσίμου. (Nicolae Scarlat, χ.χ.).....	32
Εικόνα 3-5. Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή. (Nicolae Scarlat, χ.χ.).....	33
Εικόνα 3-6.Παραγοντες εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)..	34
Εικόνα 3-7 Εκπομπές άνθρακα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ. (Nicolae Scarlat, χ.χ.).....	35
Εικόνα 3-8. Τάση μείωσης εκπομπών άνθρακα μεταξύ 1990 και 2019. (Nicolae Scarlat, χ.χ.).....	36
Εικόνα 3-9. Εξέλιξη μείωσης εκπομπών άνθρακα. (Nicolae Scarlat, χ.χ.).....	36
Εικόνα 3-10. Τρόποι απανθρακοποίησης αεριοστροβίλου. (John Catillaz, 2021).....	37
Εικόνα 3-11. Περιπτώσεις ανθρακοποίησης αεριοστροβίλων. (John Catillaz, 2021)..	37
Εικόνα 3-12. Κύκλος ζωής του άνθρακα σε μια μονάδα CCUS. (John Catillaz, 2021).....	39
Εικόνα 3-13. Διαδικασία επεξεργασίας αμμίνης. (John Catillaz, 2021).....	40
Εικόνα 4-1.Σύστημα ψεκασμού. ....	47
Εικόνα 4-2.Θάλαμος καύσης.....	47
Εικόνα 4-3. Επιστρώσεις θερμικού φραγμού (TBC) που χρησιμοποιούνται για την προστασία αεροδυναμικών επιφανειών και υλικών από τη διάβρωση, οξείδωση. Πτερύγιο με οπές που περνάει αέρας ψύξης.....	49
Εικόνα 4-4. Τομή στροβίλου. (Jim Noordermeer, 2016).....	49
Εικόνα 4-5. Τρισδιάστατη απεικόνιση αεριοστροβίλου Siemens SGT-700. (SIEMENS, 2022).....	50
Εικόνα 5-1. HRSG με καυστήρες. (Shiozaki, 2021).....	53
Εικόνα 5-2. Τρισδιάστατη απεικόνιση μονάδας HRSG (nirootavan, n.d.).....	55

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1. Συντελεστές εκπομπών καυσίμου. (Nicolae Scarlat, n.d.)	31
Πίνακας 6-1. Σύσταση φυσικού αερίου (ΕΛΑΘΕΣΣ, χ.χ.)	59
Πίνακας 6-2. Στοιχεία φυσικού αερίου. Μέσες τιμές. (ΕΛΠΕ, 2022)	60
Πίνακας 6-3. Στοιχεία αεριοστροβίλου. (SIEMENS-ENERGY, 2022)	61
Πίνακας 7-1. Σταθερά μεγέθη. (software, n.d.)	62
Πίνακας 7-2. Δεδομένα.	62
Πίνακας 7-3. Μεταβλητές.	62
Πίνακας 7-4. Συγκεντρωτικός πίνακας.	63
Πίνακας 7-5. Στοιχεία φυσικού αερίου. Μέσες τιμές. (ΕΛΠΕ, 2022)	68
Πίνακας 7-6. Χημική σύσταση φυσικού αερίου. (ΕΛΠΕ, 2022)	72
Πίνακας 7-7. Συγκεντρωτικά στοιχεία κύκλου BRAYTON.	74
Πίνακας 8-1. Θερμοκρασίες εργαζομένων μέσων στη HRSG.	78
Πίνακας 8-2. Συνθήκες για σωστή λειτουργία της HRSG	84
Πίνακας 8-3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συστήματος HRSG	84
Πίνακας 8-4. Αεριοστρόβιλος SIEMENS SGT-700. (SIEMENS, 2022)	86
Πίνακας 8-5. Σημεία κύκλου BRAYTON	86
Πίνακας 8-6. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων της μελέτης.	87

## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

## Α. ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	
ΣΗΘ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας
CHP	Combined Heat and Power
HRSG	Heat Recovery Steam Generation
TET	Turbine Entry Temperature
TIT	Turbine Inlet Temperature
SOT	Stator Outlet Temperature
AFR	Air/Fuel Ratio
AP	Approach Point
PP	Pinch Point

## B. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδα
$c_p$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση	$kJ/kg^{\circ}C$
$c_v$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο	$kJ/kg^{\circ}C$
$P_1, T_1$	Πίεση, θερμοκρασία αέρα στην είσοδο του συμπιεστή	$bar/^{\circ}C$
$P_2, T_2$	Πίεση, θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του συμπιεστή	$bar/^{\circ}C$
$P_3, T_3$	Πίεση, θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης	$bar/^{\circ}C$
$P_4, T_4$	Πίεση, θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου	$bar/^{\circ}C$
$\eta_c$	Ισεντροπικός συντελεστής	
$r_c$	Λόγος συμπίεσης	
$m_{NG}$	Μάζα φυσικού αερίου	$tn/h$
$Q_{NG}$	Θερμική ισχύς φυσικού αερίου	Kw
$\Delta H_{NG}$	Θερμογόνος δύναμη φυσικού αερίου	$kJ/kg$
E.E.K	Ειδική κατανάλωση καυσίμου	$kg/MWh$
$m_k$	Μάζα καυσαερίων	$kg/s$
$m_a$	Μάζα αέρα	$kg/s$
f	Λόγος αέρα καυσίμου	
LHV	Χαμηλή θερμογόνος δύναμη φυσικού αερίου	$kJ/kg$
$t_1$	Θερμοκρασία είσοδο φυσικού αερίου σε εναλλάκτη	$^{\circ}C$
$t_2$	Θερμοκρασία εξόδου φυσικού αερίου από εναλλάκτη	$^{\circ}C$
$\mu_{CO_2}$		
$m_{CO_2}$	Μάζα διοξειδίου του άνθρακα	$tn/y$
$E_{el}$	Ηλεκτρική ενέργεια	$MWh/y$
$P_{el}$	Ηλεκτρική ισχύς	MW
PP	Pinch point	$^{\circ}C$
AP	Approach point	$^{\circ}C$
$t_s$	Θερμοκρασία κορεσμού νερού	$^{\circ}C$
$hw_3$	Ενθαλπία κορεσμένου νερού	$kJ/kg$
$t_{s2}$	Θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού	$^{\circ}C$
$h_{s2}$	Ενθαλπία υπέρθερμου ατμού	$kJ/kg$
$tk_3$	Θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο/έξοδο του οικονομητήρα/εξατμιστή	$^{\circ}C$
$tk_4$	Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του οικονομητήρα	$^{\circ}C$
$tk_2$	Θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο/έξοδο του εξατμιστή/υπερθερμαντήρα	$^{\circ}C$
$tk_1$	Θερμοκρασία καυσαερίων στην είσοδο του υπερθερμαντήρα	$^{\circ}C$
$tw_1$	Θερμοκρασία νερού στην είσοδο του οικονομητήρα	$^{\circ}C$
$tw_2$	Θερμοκρασία νερού στην είσοδο/έξοδο του εξατμιστή/οικονομητήρα	$^{\circ}C$
$t_s$	Θερμοκρασία ατμού/νερού στην είσοδο/έξοδο του υπερθερμαντήρα/εξατμιστή	$^{\circ}C$
$ts_2$	Θερμοκρασία ατμού στην έξοδο του υπερθερμαντήρα	$^{\circ}C$
$hw_1$	Ενθαλπία νερού	$kJ/kg$
$Q_{13}$	Θερμική ενέργεια που απορροφάται από εξατμιστή/υπερθερμαντήρα	MW
$hw_2$	Ενθαλπία νερού στον οικονομητήρα	$kJ/kg$
$m_{st}$	Μάζα ατμού	$tn/h$
$h_x$	Ενθαλπία ατμού στην είσοδο του υπερθερμαντήρα	$kJ/kg$
$Q_{AB}$	Θερμική ενέργεια που απορροφάται από τον υπερθερμαντήρα	$kJ/kg$

$\Delta T_{K1,2}$	Θερμοκρασιακή διαφορά είσοδο/έξοδο υπερθερμαντήρα	°C
$Q_{CB}$	Θερμική ενέργεια που απορροφάται στον εξατμιστή	MW
$Q_{CD}$	Θερμική ενέργεια που απορροφάται στον οικονομητήρα	MW
$\Delta T_{K34}$	Θερμοκρασιακή διαφορά στην είσοδο/έξοδο του οικονομητήρα	°C
$Q_k$	Θερμική ενέργεια καυσαερίων στην είσοδο της HRSG	MW
$Q_t$	Θερμική ενέργεια που απορροφάται από τα στοιχεία του ατμολέβητα	MW
$Q_{los}$	Απώλειες θερμότητας	MW
$Q_{epif}$	Απώλειες θερμικού φορτίου λόγω ακτινοβολίας και αγωγιμότητας	MW
$\eta_{th}$	Απόδοση συστήματος HRSG	

## ΣΚΟΠΟΣ

Η διπλωματική εξετάζει την περίπτωση αγοράς πραγματικών μηχανών (του εμπορίου) για ένα εργοστάσιο της ΕΛΠΕ. Ωστόσο, οι αριθμοί της ΕΛΠΕ που χρησιμοποιούνται είναι οι ελάχιστοι δυνατοί και όχι ακριβείς αλλά ενδεικτικοί. Αντίθετα γίνεται μέγιστη χρήση δημοσιευμένων αριθμών οποιασδήποτε άλλης πηγής.

Η μηχανή έρχεται να καλύψει ανάγκες του ενεργειακού ισοζυγίου του διυλιστηρίου αλλά παράλληλα πρέπει να ενταχθεί επαρκώς σε αυτό χωρίς αδικαιολόγητο περίσσευμα ή έλλειμμα. Υπάρχουν πολλές λύσεις και απαντήσεις στο θέμα και μερικές εξ αυτών είναι και η εξαιρετικότερη λύση. Ωστόσο επελέγη μία αρχική με βάση τα δεδομένα της συγκυρίας. Αυτά τα δεδομένα είναι από την ΕΛΠΕ, τους κατασκευαστές στροβίλων και λεβήτων. Η μεθοδολογία επεξηγείται επίσης παρακάτω ώστε να υπάρχει σαφές πλαίσιο αξιολόγησης της εργασίας. Θίγονται επίσης τα επόμενα θέματα που απομένουν για το μέλλον.

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΠΕ

Οι απαιτήσεις ενέργειας του διυλιστηρίου είναι:

1. Συνολική απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ 65 MW
2. Ανάγκες σε ατμό περίπου 240 MT/h οι οποίες καλύπτονται μερικά με ατμό του αεριοστρόβιλου και μερικώς με λέβητες. Άρα η ποσότητα ατμού του στροβίλου θα σημαίνει μείωση των λεβήτων (κάποιοι που είναι παλιοί θα σταματήσουν)

Από τις παραπάνω απαιτήσεις προκύπτει με απλό τρόπο η επιλογή μηχανών με βάση μόνο την ηλεκτρική ισχύ και σύστημα συμπαραγωγής αντί του συνδυασμένου κύκλου που χρησιμοποιείται πχ στις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρισμού.

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ στροβίλων

Δεδομένα για την ηλεκτρική ισχύ και τον στρόβιλο είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή. Επιλέγεται συγκεκριμένο μοντέλο στροβίλου από συγκεκριμένη εταιρεία για προκαταρκτικούς υπολογισμούς μόνο με δημοσιευμένα στοιχεία.

Επίσης για λόγους αξιοπιστίας επιλέγεται και η λύση δύο στροβίλων με την μισή δυναμικότητα από την ίδια εταιρεία. Η απαίτηση για ηλεκτρική ισχύ είναι 100% του χρόνου ενώ οι στρόβιλοι έχουν μικρότερη (96,5% από την βιβλιογραφία).

Η εναλλακτική τροφοδοσία μετά από βλάβη όλων των στροβίλων από το δίκτυο έχει αποδειχθεί στο παρελθόν ότι απαιτεί σταμάτημα του εργοστασίου και εκτεταμένη χρήση του πυρσού και αυτό αφ' ενός ενέχει κινδύνους ντόμινο βλαβών αλλά επίσης είναι εξαιρετικά ακριβό ώστε να δικαιολογεί την προσθήκη του δευτέρου στροβίλου. Εκτιμάται ότι δεν απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός στροβίλων εφόσον το εργοστάσιο με τον ένα μόνο δεν απαιτείται να σταματήσει την παραγωγή του αλλά μπορεί να χρησιμοποιήσει αποθέματα παραγωγής για την κάλυψη των πωλήσεων. Πέραν της παραγωγής ο δεύτερος στρόβιλος καλύπτει και τα θέματα ασφαλείας (κρίσιμα φορτία) που είναι κυρίως τα φορτία εξοπλισμού που εξασφαλίζει την ψύξη των διαφόρων διεργασιών (όπως πχ reflux, recycle κλπ). Η μεγαλύτερη ψύξη οδηγεί και σε πολύ μικρότερη χρήση του πυρσού σε ενδεχόμενο σταμάτημα. Με δύο στροβίλους δεν απαιτείται χρήση του πυρσού αν σταματήσει εκτάκτως ο ένας από μη συστηματική βλάβη.

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ λεβήτων

Τα δεδομένα αυτά του κατασκευαστή καλύπτουν μόνο την απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια. Για την εκτίμηση της παραγωγής ατμού γίνεται ισοζύγιο ενέργειας (με βάση προσεγγιστικές πρακτικές σχεδιασμού των συσκευών εναλλαγής θερμότητας) για τον λέβητα που τροφοδοτεί το καυσαέριο του αεριοστρόβιλου. Ο λέβητας αυτός ονομάζεται εμπορικά heat recovery steam generator.

Ο λέβητας αυτός (HRSG) μπορεί να είναι waste heat boiler δηλαδή να εκμεταλλεύεται την ενέργεια μόνο των καυσαερίων ή να έχει και επί πλέον καύσιμο ώστε να καλύπτει τυχόν επί πλέον παραγωγή ατμού. Ωστόσο, η ύπαρξη λεβήτων στο εργοστάσιο δεν απαιτεί επί πλέον ατμό παρά μόνο αυτό που παράγεται από τα καυσαέρια. Πρακτικά δηλαδή ο HRSG θα είναι μόνο Waste heat boiler για την διπλωματική εργασία. Η χρήση επί πλέον καυσίμου αφορά έργο αντικατάστασης λεβήτων με HRSG που είναι ξεχωριστό από την εργασία.

### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΟΡΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αυτές οι πρακτικές δίνουν εκτίμηση για την παραγωγή ατμού και ενέργειας ώστε να γίνει μια ρεαλιστική εικόνα και σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών λύσεων (ένας ή δύο αεριοστρόβιλοι). Ωστόσο τέθηκαν σαφή όρια ώστε να είναι εφικτή η τήρηση των προθεσμιών (εκτός COVID, δυσλειτουργίας κλπ προβλημάτων).

- (initial vs commercial) Η διπλωματική σταματά στις εκτιμήσεις αυτές αλλά περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να γίνει με οικονομικά στοιχεία και βέβαια με περισσότερους κατασκευαστές και τουρμπινών και λεβήτων και εναλλακτικών κλπ. Αυτό αφήνεται για επόμενες διπλωματικές ως ενδεχόμενη εμβάθυνση στο θέμα.
- (rating vs. optimal design) Η μέθοδος που επιλέγεται εδώ δεν είναι του αρχικού σχεδιασμού (design) αλλά της μέγιστης χρήσης δεδομένων από τον κατασκευαστή ή την βιβλιογραφία και μάλιστα χωρίς καμία αριστοποίηση (rating only calculations) ώστε να επιτευχθεί μια αρχική λύση. Σε αυτή την κατεύθυνση στο μέλλον μπορεί να επεκταθεί η διπλωματική και στην αριστοποίηση των στρόβιλων (βέλτιστη τεχνολογία σε κάθε τμήμα εξοπλισμού, υλικών και αξιοπιστίας).
- (equipment vs system) Περισσότερο από τον στρόβιλο ενδιαφέρει η αριστοποίηση του ενεργειακού συστήματος που εντάσσεται ο στρόβιλος οι λέβητες και οι διάφορες μονάδες του εργοστασίου. Σήμερα και με βάση τον συντελούμενο ενεργειακό μετασχηματισμό (πράσινα καύσιμα κλπ) τέτοια ανάγκη είναι ακόμα μεγαλύτερη. Ενδεικτικά για την ΕΛΠΕ αυτό οδηγεί σε μεταβατικά αεριοστρόβιλο και τελικά electrification με πράσινο ηλεκτρισμό πράγμα μεν απλό αλλά με εξαιρετικά δύσκολο χρονοδιάγραμμα του μετασχηματισμού καθώς και κόστος υλοποίησης.

Τέτοιες μελέτες όπως commercial, optimal design ή systems engineering υπερβαίνουν όμως τον χρόνο μιας διπλωματικής και δεν επελέγησαν σκοπίμως στην παρούσα εργασία. Αντιθέτως επελέγησαν initial equipment rating calculations.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συμπαραγωγή είναι μια διαδομένη μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις βιομηχανίες. Ολοένα και περισσότερες βιομηχανίες που εξαρτώνται από την ηλεκτρική ενέργεια πρωτίστως, αλλά ως επί το πλείστον οι μεγάλες βιομηχανίες έχουν ανάγκη τη θερμότητα και τον ατμό, για αυτό το λόγο υιοθετούν τις ΣΗΘ για να καλύψουν τις ανάγκες τους. Με την συγκεκριμένη μορφή εξασφαλίζουν και τα δυο. Έτσι επιτυγχάνεται η μη εξάρτηση τους από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης λόγω της φύσης τους οι ΣΗΘ παρέχουν και την απαιτούμενη θερμότητα. Με αυτό τον τρόπο η επιχείρηση εξοικονομεί κεφάλαια που θα τα χρησιμοποιούσε για την αγορά επιπρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας ούτως ώστε να παράξει ατμό.

Επιπρόσθετα λόγω της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης καθώς και τη μείωσή των αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα επιβάλλεται η ορθολογικότερη χρήση της πρωτογενούς ενέργειας. Με τις σύγχρονες μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 40-65% της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το υπόλοιπο μέρος 60-35% να αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή θερμότητας. Για να μειωθεί αυτή η χαμένη ενέργεια αλλά και η κατανάλωση επιπρόσθετου καυσίμου, εφαρμόζεται η **Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θέρμανσης, ΣΗΘ** ή απλά **Συμπαραγωγή**. Με τον όρο συμπαραγωγή εννοούμε τη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας σε ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο σύστημα. Με αυτό τον τρόπο η τεχνολογία των ΣΗΘ εκμεταλλεύεται τη παραγομένη θερμότητα που παράγεται από την συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική απόδοση των συστημάτων αυτών. Αυτή η αύξηση της συνολικής απόδοσης οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμων και κατ' επέκταση σε μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ο αυξανόμενος ρυθμός χρησιμοποίησης αυτής της τεχνολογίας οφείλεται σε ένα βαθμό στην απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το γεγονός έστρεψε το ενδιαφέρον των ιδιωτών, προς τη συγκεκριμένη τεχνολογία, οι οποίοι είτε μπορούν να παράγουν ρεύμα για ιδιοκατατανάλωση, είτε να το πουλούν. Οι πρώτοι οι οποίοι ενδιαφέρθηκαν για αυτού του είδους την τεχνολογία, ήταν οι βιομηχανίες που

θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν τις διεργασίες τους με φθινό ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα, οι οποίοι είχαν τις υποδομές για την εγκατάσταση τέτοιου είδους συστήματος.

Με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο που καταναλώνεται και όχι σε ένα μεγάλο κεντρικό σημείο, αποφεύγονται οι απώλειες κατά την μεταφορά και αυξάνεται η ευελιξία του συστήματος μεταφοράς και διανομής. Επίσης αυξάνεται και η αξιοπιστία και ευστάθεια ολοκλήρου του εθνικού δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι αποφορτίζεται το δίκτυο καθώς ολόένα και περισσότεροι καταναλωτές, μεγάλης ηλεκτρικής ενέργειας, παράγουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια.



## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-1. Θερμοδυναμικός κύκλος αεριοστρόβιλου.

### 1.1 Θερμοδυναμική.

Είναι μια επιστήμη η οποία μελετάει τη μετατροπή της ενέργειας από μηχανική -έργο- σε θερμότητα και αντίστροφα, αυτό επιτυγχάνεται μέσα από τη μελέτη θερμικών διεργασιών. Ο ορός διεργασία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη. Η συγκεκριμένη επιστήμη ασχολείται με την μακροσκοπική απόκριση των συστημάτων που την αποτελούν, και που μπορούμε να υπολογίσουμε με ακρίβεια.

Η λέξη «**Θερμοδυναμική**» έχει το εξής νόημα:

Θερμοδυναμική = «θερμό + δυναμική» δηλαδή ο τομέας που ασχολείται με την δυναμική (μεταφορά και μετατροπή σε άλλη μορφή ενέργειας) της θερμότητας. (el.wikipedia, 2022)

#### Νόμοι της θερμοδυναμικής.

- **Πρώτος Θερμοδυναμικός νόμος.** Στον συγκεκριμένο νόμο διατυπώθηκε η αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Δηλαδή δηλώνεται ότι η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί, μπορεί να μετατρέπεται από μια μορφή σε μια άλλη. (el.wikipedia, 2022)

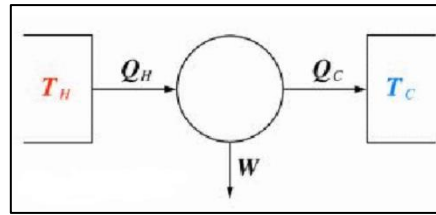
Γενική μαθηματική έκφραση:

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{in} - E_{out})$$

- **Δεύτερος Θερμοδυναμικός νόμος.** Σύμφωνα με τους φυσικούς **Kelvin και Planck:** είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μια θερμική μηχανή που να μπορεί να μετασχηματίζει τη θερμότητα σε ωφέλιμο έργο 100%. (Πελλής, 2012)

Γενική μαθηματική έκφραση:

$$Q_H = W + Q_C \cdot W$$



Σχήμα 1-1. Διάγραμμα 2<sup>ov</sup> θερμοδυναμικού νόμου

- **Τρίτος Θερμοδυναμικός νόμος.** Σε αυτόν τον νόμο η εντροπία ( $s$ ), που είναι μέτρο της τάξης ή της αταξίας ενός συστήματος, σε απόλυτη θερμοκρασία  $T=0$  K είναι μηδέν ( $s=0$ ). Η φυσική ερμηνεία αυτού του νόμου, υποδεικνύει ότι είναι αδύνατον η θερμοκρασία ενός συστήματος να φτάσει μέσω μιας διεργασίας στο απόλυτο μηδέν της κλίμακας Κέλβιν σε πεπερασμένο αριθμό βημάτων. (el.wikipedia, 2022)

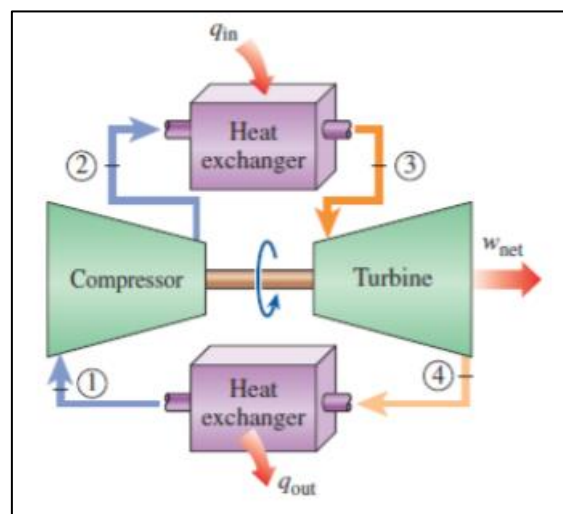
$$\text{Ορισμός: } \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

## 1.2 Κύκλος BRAYTON. Ο ιδανικός κύκλος αεροστρόβιλων.

Γύρω στο 870 προτάθηκε, από τον George Brayton, για χρήση ο συγκεκριμένος κύκλος. Στις μέρες μας χρησιμοποιείται αποκλειστικά στους αεροστροβίλους όπου εκεί λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα οι διεργασίες της συμπίεσης και της εκτόνωσης.

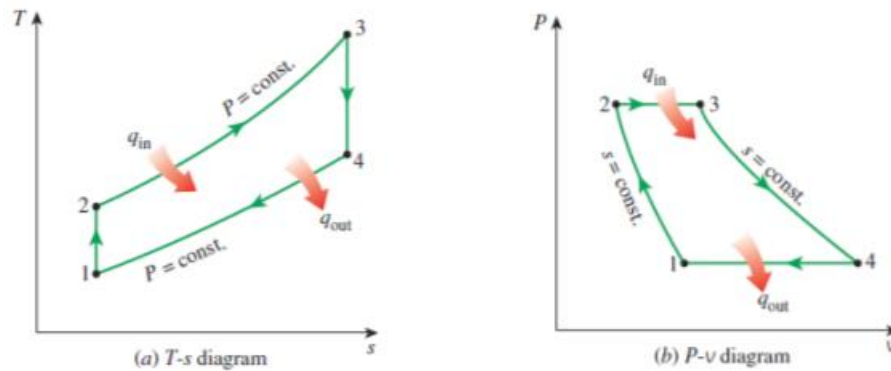
Στην εικόνα () βλέπουμε σε διάγραμμα την λειτουργία ανοιχτού κύκλου BRAYTON. Ο ιδανικός κύκλος περιγράφεται από τις παρακάτω τέσσερις μεταβολές (Μανωλάκος, χ.χ.)

1. 1-2 Ισεντροπική συμπίεση (στο συμπιεστή)
2. 2-3 Ισοθληπτική πρόσδοση θερμότητας
3. 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση (στο στρόβιλο)
4. 4-1 Ισοθληπτική απόρριψη θερμότητας.



Σχήμα 1-2. Κλειστός κύκλος BRAYTON

Οι συνθήκες θεωρούνται μόνιμες και οι παράγοντες της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας αμελούνται. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα T-s και P-v του ιδανικού κύκλου BRAYTON. (Μανωλάκος, χ.χ.)



Σχήμα 1-3. Διαγράμματα κύκλου BRAYTON  
(Μανωλάκος, χ.χ.)

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ισοζύγιο ενέργειας για μόνιμη ροή ανά μονάδα μάζας εκφράζεται ως εξής:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = h_{exit} - h_{inlet}$$

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάδοση θερμότητας από και προς το σύστημα είναι:

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p * (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p * (T_4 - T_1)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω η θερμική απόδοση του κύκλου BRAYTON, θεωρώντας το πρότυπο ψυχρού αέρα, είναι η εξής:

$$\eta_{th,BRAY} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p * (T_4 - T_1)}{c_p * (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 * (T_4/T_1 - 1)}{T_2 * (T_3/T_2 - 1)}$$

Οι διεργασίες 1-2 και 3-4 είναι ισεντροπικές, ενώ  $P_2 = P_3$  και  $P_4 = P_1$ . Με βάση αυτά έχουμε:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{(k-1)/k} = \frac{T_3}{T_4}$$

Εάν αντικαταστήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις σε αυτήν της θερμικής απόδοσης τότε προκύπτει:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

Όπου:  $r_p = \frac{P_2}{P_1}$

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-2. Συμπαράγωγή (Combined Heat and Power, CHP).

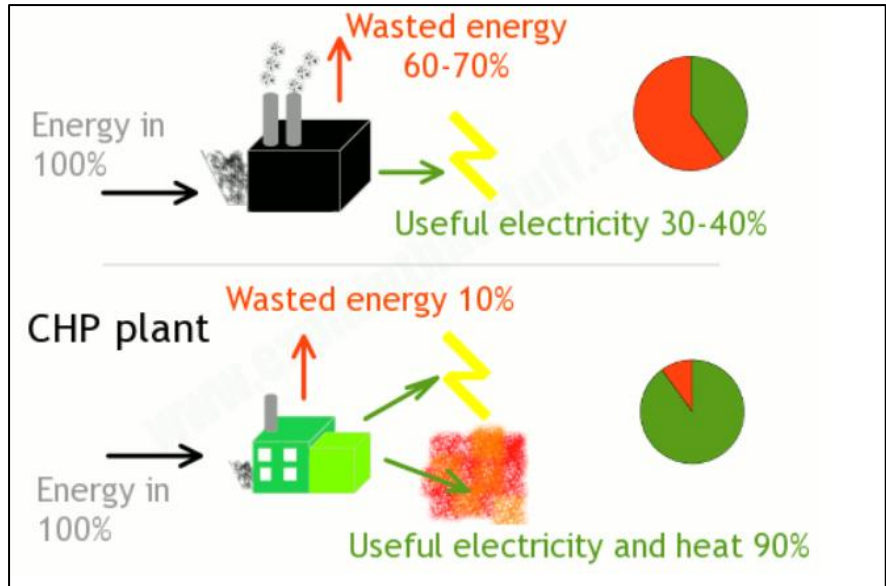
Συμπαράγωγή ονομάζουμε τη συνδυασμένη παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής (Combined Heat and Power, CHP) με χρήση του ίδιου καυσίμου. Η συγκεκριμένη μονάδα μπορεί να λάβει διάφορες μορφές και να περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες, άλλα πάντα θα βασίζεται στη θεμελιώδη λειτουργία της που είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάκτηση θερμότητας. Από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται θερμότητα η οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση ή για άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Γενικά οι μονάδες ΣΗΘ μπορούν να μετατρέψουν το 75-80% της πηγής καυσίμου, σε χρήσιμη ενέργεια. Οι δε πιο σύγχρονες μονάδες επιτυγχάνουν απόδοση 90% ή περισσότερο.

### 2.1 Αρχή λειτουργίας της ΣΗΘ.

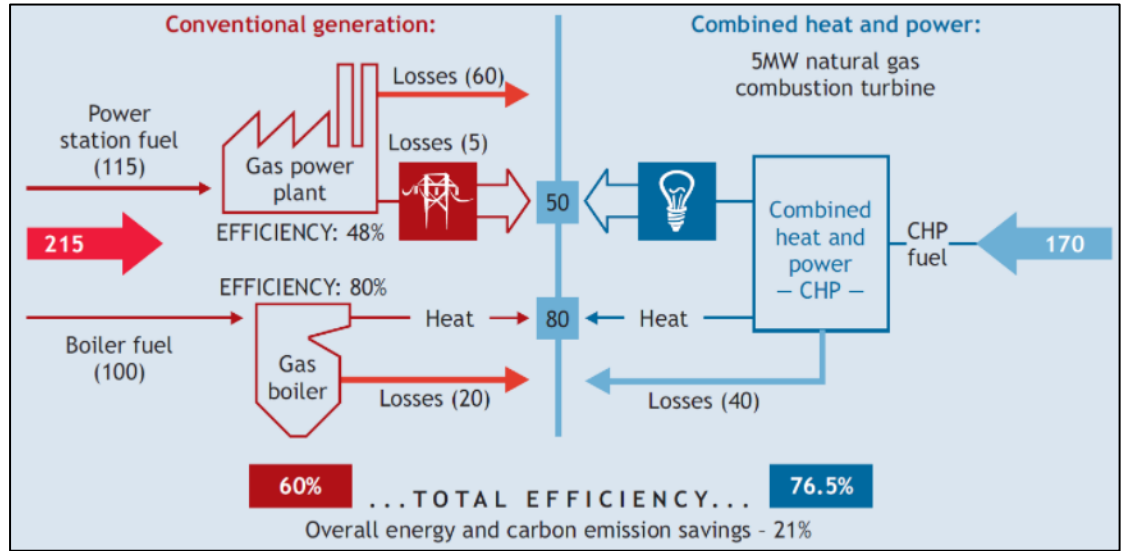
Κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα συμβατικό σταθμό, παράγονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας, οι οποίες μέσω των καυσαερίων οδηγούνται σε κυκλώματα ψύξης και εν συνέχεια στην ατμόσφαιρα. Με αυτό το τρόπο αυτή η πηγή ενέργειας σπαταλάτε χωρίς να χρησιμοποιείται. Για το λόγο με την ΣΗΘ αξιοποιούμε αυτή τη θερμότητα προς όφελος μας, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική απόδοση της διαδικασίας. (Woodford, 2021)

Λόγο του ότι η μεταφορά θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις είναι δύσκολη, τα συγκεκριμένα συστήματα βρίσκονται συνήθως κοντά στα σημεία όπου υπάρχει ζήτηση της θερμότητας και της ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό συνήθως τις συγκεκριμένες μονάδες τις βρίσκουμε κοντά σε κατοικημένες περιοχές ή μέσα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Οι μονάδες ΣΗΘ χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που παράγεται από το καύσιμο αυξάνουν την απόδοση του καυσίμου περίπου στο 90%. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 15-40%, συγκριτικά με τις χωριστές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. (IEA, 2008)



Σχήμα 2-1 Αρχή μονάδας ΣΗΘ. (Woodford, 1)

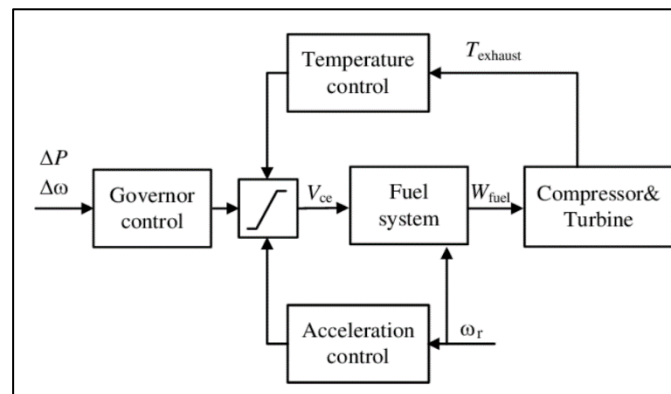


Σχήμα 2-2 Απόδοση χωριστής και συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. (IEA, 2008)

## 2.2 Τεχνολογίες και συστήματα ΣΗΘ.

Μια εγκατάσταση συμπαραγωγής αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Στρόβιλος ή κινητήρας
- Ηλεκτρογεννήτρια
- Σύστημα ανάκτησης θερμότητας (HRSG)
- Σύστημα ελέγχου.



Με τη διαδικασία της καύσης του καυσίμου είτε δημιουργείται άμεσα μηχανική ενέργεια, είτε παράγεται ατμός ο οποίος κινεί έναν ατμοστρόβιλο, όπου στη συνέχεια παράγεται μηχανική ενέργεια. Η παραγομένη μηχανική ενέργεια στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της περιστροφής μιας γεννήτριας.

Τα συστήματα συμπαραγωγής χρησιμοποιούν τους ίδιους στρόβιλους με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή ατμοστρόβιλους για μονάδες με καύση στερεών καυσίμων (βιομάζα, άνθρακα) ή αεριοστρόβιλους με αέριο καύσιμο (φυσικό αέριο, βιοαέριο).

Οι περισσότερες μονάδες συμπαραγωγής με μεγάλη ισχύ τοποθετούνται για βιομηχανική χρήση ή τηλεθέρμανση και ψύξη. Ένα μεγάλο ποσοστό αυτών των μονάδων, περίπου στο 80%, χρησιμοποιείται από ενεργοβόρες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως για παράδειγμα βιομηχανίες επεξεργασίας χαρτιού, τροφίμων, χημικών προϊόντων, μετάλλων και διύλισης πετρελαίου.



### 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μονάδων ΣΗΘ.

Οι μονάδες συμπαραγωγής έχουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Αυξημένη απόδοση καυσίμου. Οι συγκεκριμένες μονάδες είναι γνωστές για το υψηλό επίπεδο απόδοσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται λιγότερο καύσιμο για την παραγωγή των συγκεκριμένων επίπεδων ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε σύγκριση με άλλα συστήματα.
- Μείωση της σπάταλης ενέργειας. Ορισμένα απόβλητα που καταλήγουν σε χωματερές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία των μονάδων αυτών. Αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα.
- Μειωμένο ενεργειακό κόστος. Λόγο του ότι τα συγκεκριμένα συστήματα είναι αποτελεσματικά έχουν σαν αποτέλεσμα το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος
- Μειωμένες εκπομπές αέριων θερμοκηπίου
- Μειωμένη εξάρτηση από το δίκτυο. Οι συγκεκριμένες μονάδες μπορούν να καταστήσουν μια επιχείρηση ενεργειακά αυτόνομη, χωρίς να εξαρτάται από το δίκτυο. Θα έχει μεγαλύτερη ενεργειακή ασφάλεια.
- Διάφορες επιλογές καυσίμου. Οι συγκεκριμένες μονάδες είναι αρκετά ευέλικτες και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ευρεία γκάμα καυσίμων. Όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, μεθάνιο, ντίζελ, βιοντίζελ, προπάνιο κ.α. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το υδρογόνο το οποίο είναι ένα καύσιμο που τώρα αρχίζει να παράγεται.

Βέβαια όπως κάθε σύστημα έχει πλεονεκτήματα έχει και κάποια μειονεκτήματα.

Τα μειονεκτήματα των συστημάτων ΣΗΘ είναι τα εξής:

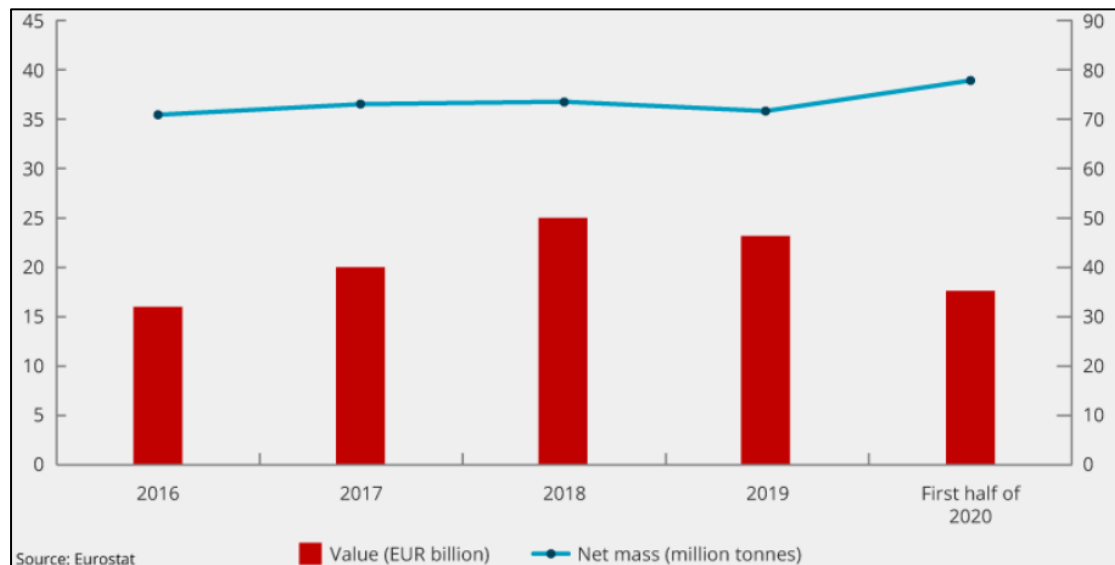
- Δεν είναι μια εγγενής πηγή ενέργειας. Η συμπαραγωγή χρησιμοποιεί την ενέργεια των καυσίμων ούτως ώστε να τη μετατρέψει σε άλλη μορφή με πιο αποτελεσματικό τρόπο.
- Μπορεί να είναι δαπανηρή. Το κόστος για μια τέτοια εγκατάσταση μπορεί να είναι υψηλό. Ορισμένες φορές μπορεί να μην οικονομικά βιώσιμη μια τέτοια επένδυση αν εξετασθεί μακροπρόθεσμα.
- Όχι πάντα φιλικό προς το περιβάλλον. Ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται μπορούμε να πούμε ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι φιλικό ή όχι προς το περιβάλλον.

Παραπάνω είδαμε και αναλύσαμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ενός συστήματος ΣΗΘ. Εξετάζοντας τα μπορούμε να αποφασίσουμε ανάλογα τις ανάγκες μας αν είναι κατάλληλο το σύστημα ή όχι για την κάλυψη των αναγκών μας. Μπορεί το κόστος της εγκατάστασης να είναι αποτρεπτικό στην αρχή, αλλά μακροπρόθεσμα μπορεί αυτό να αντισταθμιστεί. (INOPLEX, n.d.)

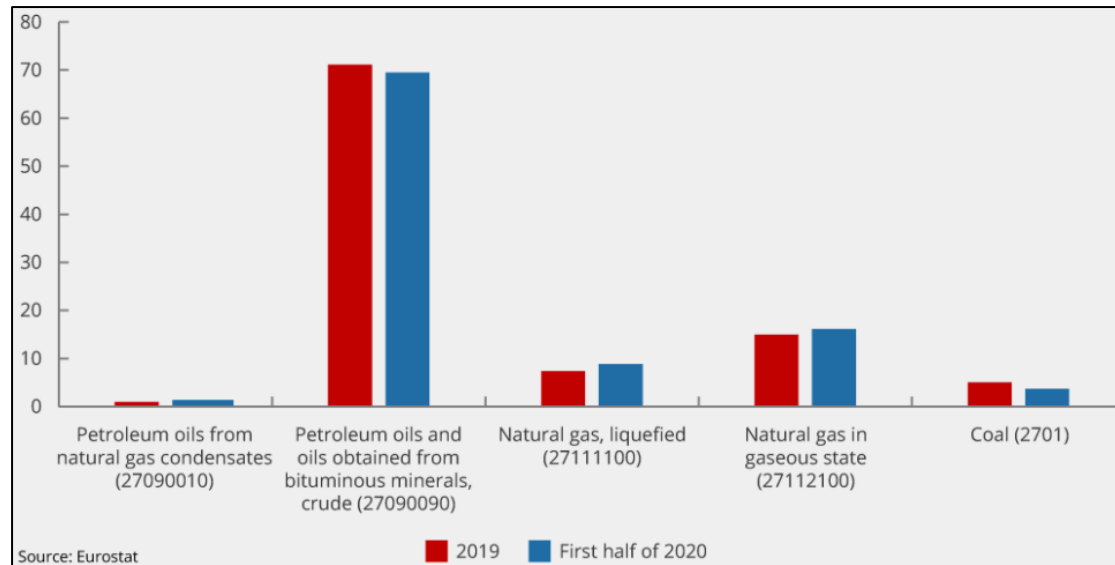
## 2.4 Διαθεσιμότητα καυσίμου.

Τα συγκεκριμένα σύστημα CHP έχουν ως βασικό καύσιμο το φυσικό αέριο. Θεωρείται πιο καθαρό σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα οπότε είναι σημαντικό για την υποστήριξη μιας βιώσιμης ανάπτυξης.

Η ευρωπαϊκή ένωση εισάγει φυσικό αέριο από το εξωτερικό. Αυτό καθιστά τα κράτη και τις επιχειρήσεις της ευρωπαϊκής ένωσης ενεργειακά εξαρτώμενα από άλλα κράτη εκτός Ευρώπης. Μέχρι το 2018 η εξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας, από τη τελευταία, ξεπέρασε το 58%. Σύμφωνα με τη EUROSTAT το πρώτο εξάμηνο του 2020 η ΕΕ περίπου 77.9 εκατ. Τόνους ενεργειακά προϊόντα, το οποίο αποτελεί ρεκόρ. Από αυτή την ποσότητα το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αντιπροσωπεύουν το 69% και το 16% των εισαγωγών αντίστοιχα. (Antonenko, 2020)

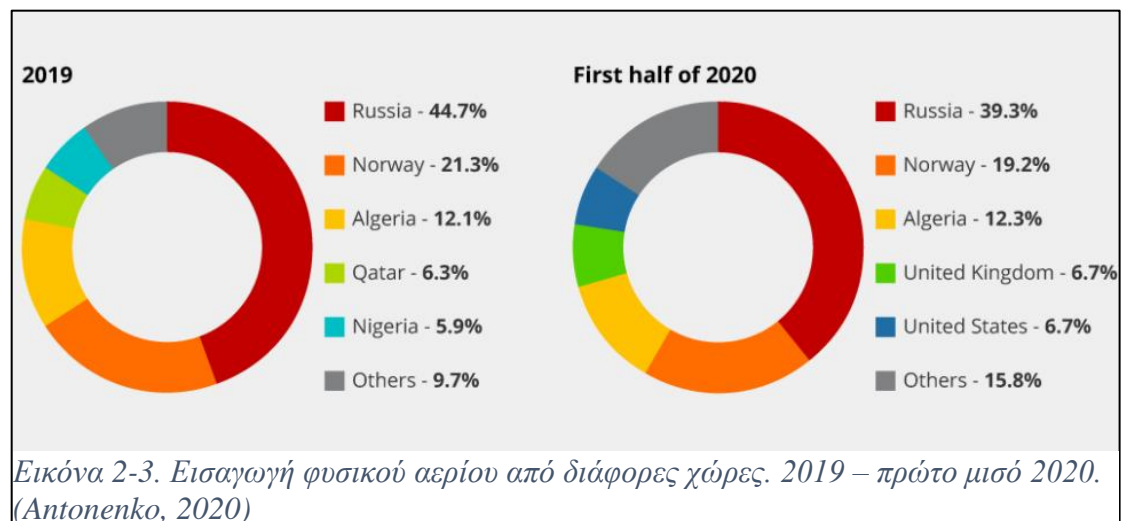


Εικόνα 2-1. Εισαγωγή ενεργειακών προϊόντων 2016 - Ιούνιος 2020. (Μηνιαία μέση τιμή). (Antonenko, 2020)



Εικόνα 2-2. Κατανομή ενεργειακών προϊόντων 2019- πρώτο μισό 2020. (Antonenko, 2020)

Όπως βλέπουμε στο παρακάτω διάγραμμα η Ρωσία παρέμεινε ως ο κύριος εισαγωγέας φυσικού αερίου στην Ευρώπη, έχοντας μερίδιο στην αγορά περίπου στο 40% το 2020.



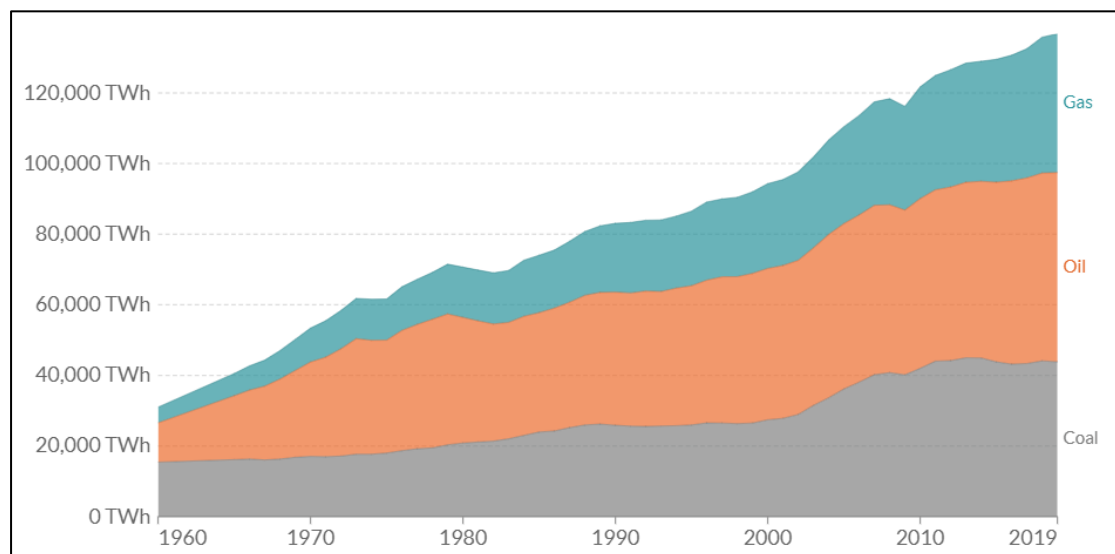
Εικόνα 2-3. Εισαγωγή φυσικού αερίου από διάφορες χώρες. 2019 – πρώτο μισό 2020. (Antonenko, 2020)

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-3. Εκπομπές CO<sub>2</sub> και τρόποι αντιμετώπισης.

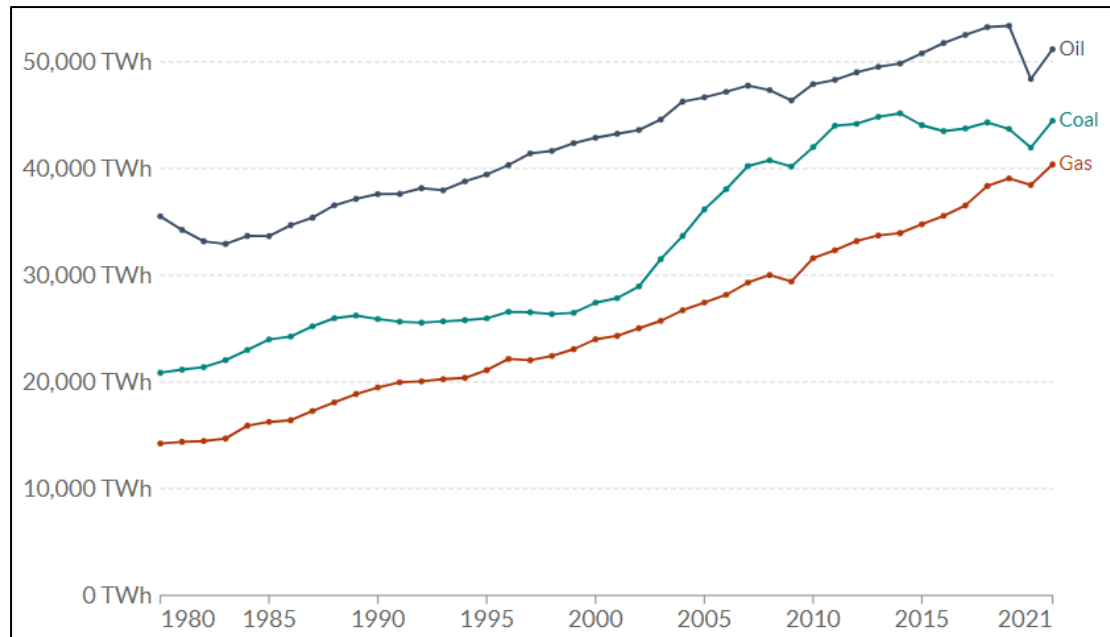
#### 3.1 Γενικά

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο της συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο είδαμε ότι έχει αρκετά θετικά στοιχεία. Βέβαια εκ φύσεως αυτή η μονάδα για να δουλέψει καίει φυσικό αέριο. Η καύση του φυσικού αερίου δημιουργεί εκπομπές που συμβάλλουν στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

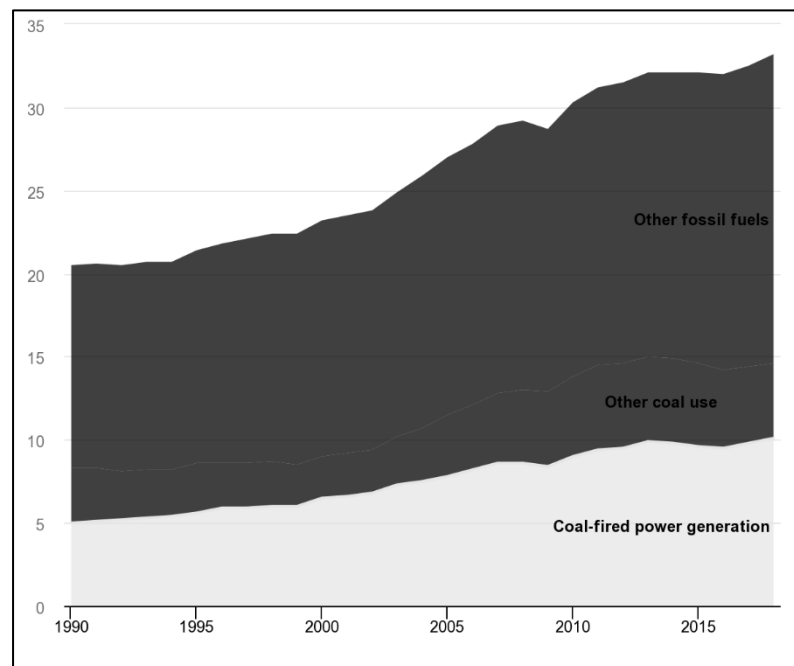
Σύμφωνα με την ΕΕ ο στόχος που είχε τοποθετηθεί στη συμφωνία του Παρισιού για να σταθεροποιηθεί η μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη στους 2°C και να γίνουν προσπάθειες μείωσης στον 1,5°C, δεν έχει επιτευχθεί. Σύμφωνα με την Διεθνή Οργάνωση Ενέργειας (IEA), η παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων συνεχίζεται να αυξάνεται [Εικόνα 3-1,Εικόνα 3-2] Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συνεχίζεται η αύξηση των αέριων του θερμοκηπίου κατά 1,7% το 2018, φτάνοντας στο μέγιστο των 33,1 Gt CO<sub>2e</sub>. Στην Ευρώπη αντιθέτως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειωθήκαν κατά 24%, μεταξύ 1990 και 2019..(Nicolae Scarlat, n.d.)



Εικόνα 3-1. Παγκόσμια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων. (Dr. Max Roser, n.d.)



Εικόνα 3-2. Παγκόσμια κατανάλωση καυσίμων. (Dr. Max Roser, χ.χ.)



Εικόνα 3-3. Παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. (IEA, n.d.)

Προκειμένου να συνεχιστεί η μείωση εκπομπών του θερμοκηπίου η ΕΕ ενέκρινε μια νομοθεσία με στόχο ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η Λευκή Βίβλος όπως ονομάζεται, πρότεινε τον διπλασιασμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από 6% σε 12% έως το 2010. Επιπρόσθετα μια άλλη δέσμευση του συμβουλίου είναι έως το 2050 οι εκπομπές να έχουν μειωθεί από 80% σε 95%. (Nicolae Scarlat, n.d.)

Στη συνέχεια θα δούμε ένα πίνακα ο οποίος μας δείχνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στον κύκλο ζωής των καυσίμων. Οι εκπομπές αυτές αναφέρονται σε όλες τις διαδικασίες και τις φάσεις που απαιτούνται ούτως ώστε το καύσιμο να είναι έτοιμο για

να τροφοδοτήσει την παραγωγή ενέργειας. Οι φάσεις αυτές είναι η εξόρυξη, η διύλιση και η μεταφορά. (Nicolae Scarlat, n.d.)

Καύσιμα	Συντελεστής εκπομπών [g CO <sub>2eq</sub> /MJ καυσίμου ]
Σκληρός άνθρακας <sup>1</sup>	16.0
Καφέ άνθρακας <sup>2</sup>	1.7
Αέρια άνθρακα	0
Προϊόντα πετρελαίου	10.7
Φυσικό αέριο	12.8
Στερεά βιοκαύσιμα	0,7
Υγρά βιοκαύσιμα	46.8
Βιομηχανικά απόβλητα	0
Αστικά απόβλητα	0
Βιοαέρια	14.9
Πυρηνικός	1.4

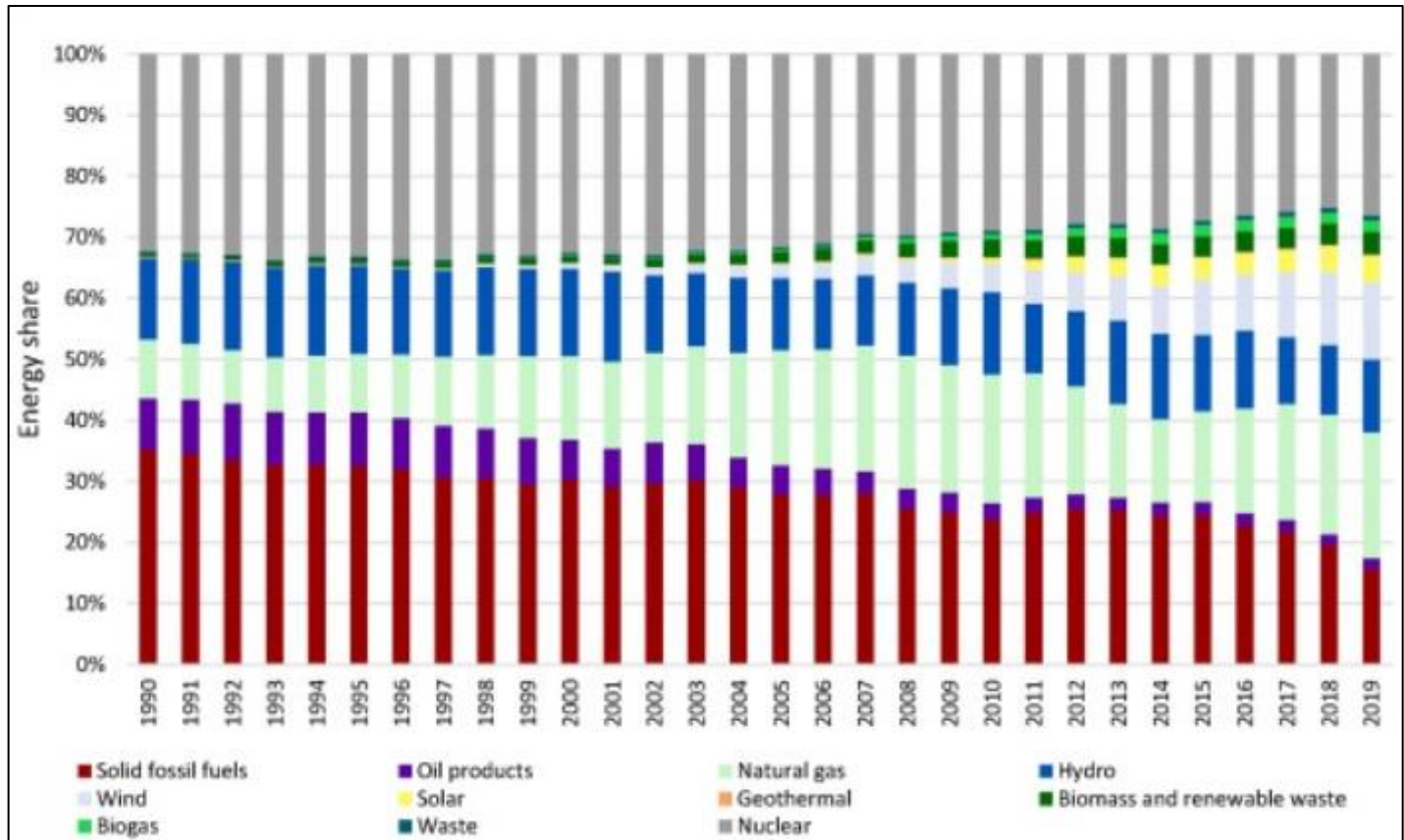
<sup>1</sup> Ο σκληρός άνθρακας περιλαμβάνει τον ανθρακίτη, τον άνθρακα οπιανθρακοποίησης και άλλους ασφαλτούχους άνθρακα .

<sup>2</sup> Ο καφές άνθρακας περιλαμβάνει τον υποασφαλικό άνθρακα και τον λιγνίτη .

Πίνακας 3-1. Συντελεστές εκπομπών καυσίμου. (Nicolae Scarlat, n.d.)

### 3.2 Διαμόρφωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην εικόνα (3-4) βλέπουμε την εξέλιξη στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ. Παρατηρείται στο σχετικό διάγραμμα μια ελαφρά μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων η



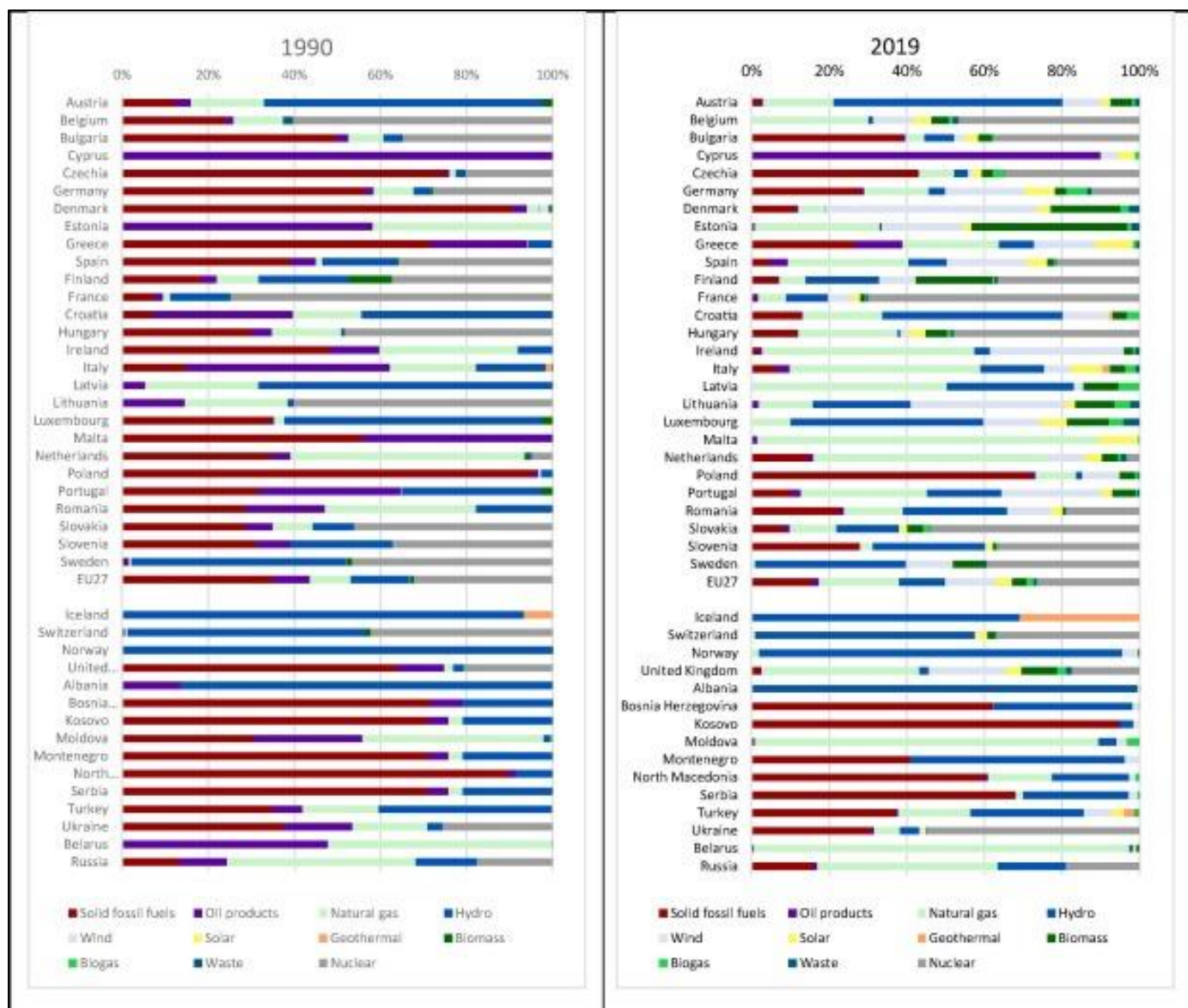
οποία έχει αντικατασταθεί από τη χρήση του φυσικού αερίου. Επιπρόσθετα παρατηρούμε γενικά μια διακύμανση στη χρήση φυσικού αερίου. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν εν μέρη να εξηγηθούν από την αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όσο αναφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπάρχει μια σαφής αύξηση στο μερίδιο αγοράς.

*Εικόνα 3-4. Διαμόρφωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας βάση καυσίμων στην Ευρώπη. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)*

Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε το μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχει διαμορφωθεί το 2019 σε σχέση με το 1990. Και εδώ παρατηρείται η μείωση των ορυκτών καυσίμων και στέρεων και αντικατάσταση αυτών με πηγές χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (αιολική, ηλιακή, βιομάζα και βιοαέριο).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει σαν στόχο τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο 50% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

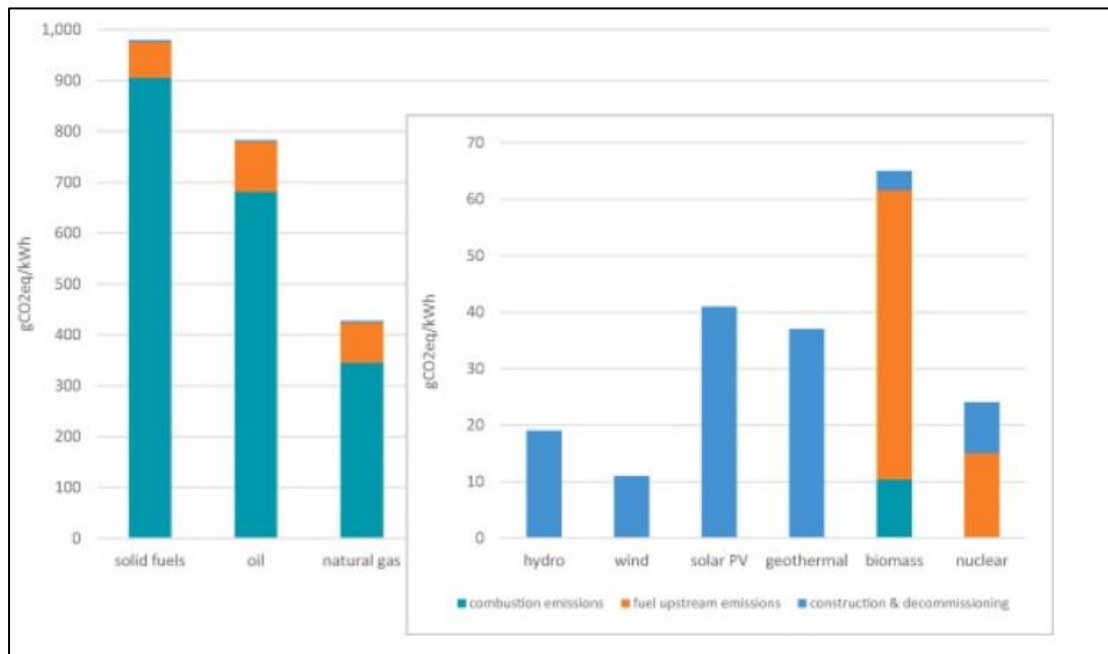




Εικόνα 3-5. Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

### 3.3 Ένταση άνθρακα στην ηλεκτροπαραγωγή.

Για να μπορέσουμε να έχουμε ρεαλιστικές εκτιμήσεις για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ελήφθησαν υπόψη οι εκπομπές που έχουμε από τα ορυκτά καύσιμα, εκπομπές καύσης, καθώς και οι εκπομπές από την κατασκευή και τον παροπλισμό σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρακάτω εικόνα(3-4) βλέπουμε τα αποτελέσματα αυτά που αφορούν την ΕΕ27.

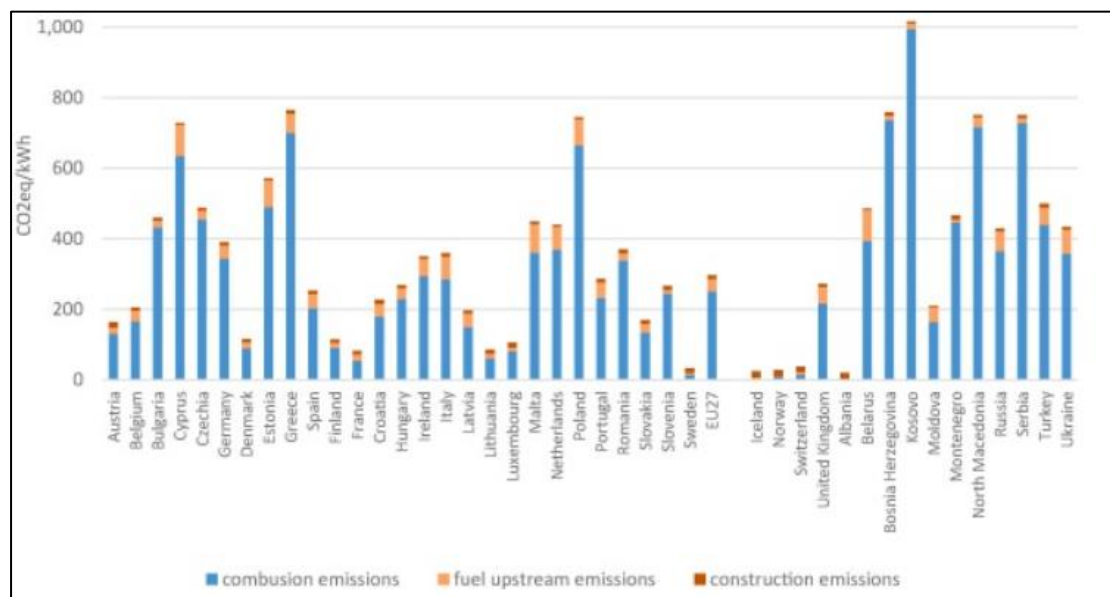


Εικόνα 3-6. Παράγοντες εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τις διάφορες στις εκπομπές που προέρχονται από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω ορυκτών καυσίμων (στερεά καύσιμα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) σε σύγκριση με τις πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα (ανανεώσιμες και πυρηνικές). Παρατηρούμε επίσης ότι οι εκπομπές καύσης είναι μεγαλύτερες ενώ οι εκπομπές για την κατασκευή και παροπλισμό είναι πολύ μικρές έως και αμελητέες. Αντίθετα με τις πηγές που έχουν χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παρατηρούμε ότι στον τομέα της κατασκευής και παροπλισμού αν και οι εκπομπές είναι μικρές βλέπουμε ότι έχουν την πλειονότητα. Κυρίως αυτό συμβαίνει με τα πυρηνικά εργοστάσια.

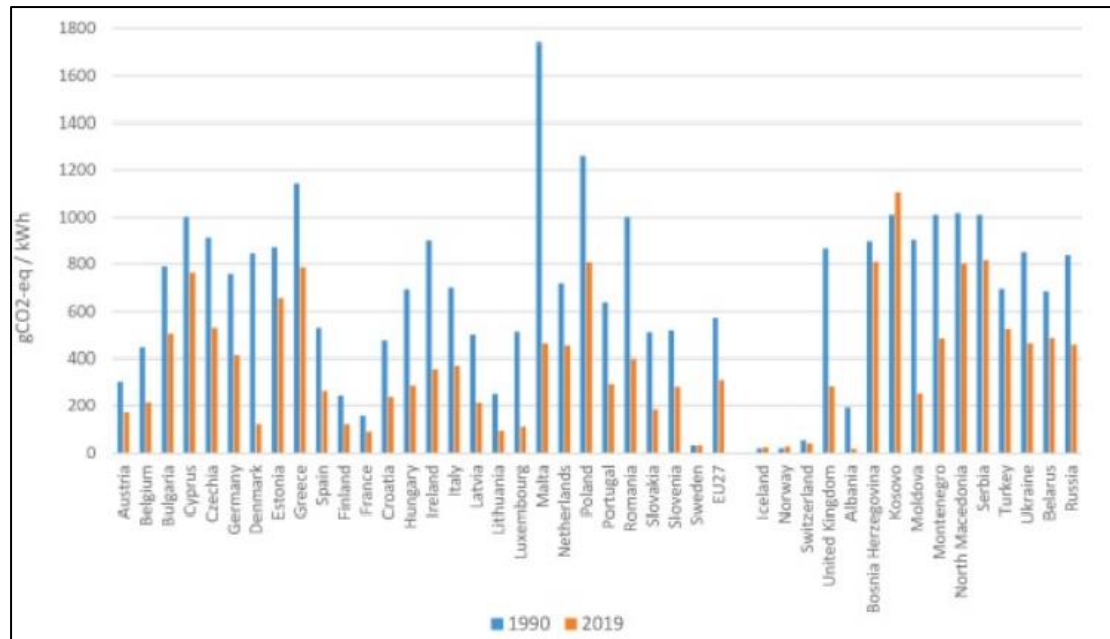
Οι εκτιμήσεις της έντασης άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας δείχνουν ότι στην ΕΕ27, οι εκπομπές που σχετίζονται με την ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έφτασαν τα 296 gCO<sub>2</sub> /kWh ηλεκτρικής ενέργειας, εκ των οποίων 251 gCO<sub>2</sub> /kWh σχετίζονται με την καύση καυσίμου, 36 gCO<sub>2</sub> /kWh σχετίζονται με την προμήθεια του ορυκτού καυσίμου και 9 gCO<sub>2</sub> /kWh σχετίζονται με την κατασκευή και τον παροπλισμό σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εκπομπές άνθρακα από την ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες το 2019 φαίνονται [εικόνα (3-7)]. Οι διαφορές που βλέπουμε μεταξύ των χωρών

δημιουργούνται ανάλογα με την πηγή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι διαφορές ποικίλλουν μεταξύ 7 και 122 gCO<sub>2</sub>/kWh. Τέλος ένα άλλο στοιχείο που βλέπουμε [εικόνα (3-7)] είναι οι εκπομπές που σχετίζονται με την κατασκευή και τον παροπλισμό σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι οποίες είναι αρκετά χαμηλά συγκριτικά με τις εκπομπές καύσης, μεταξύ 3 και 19 gCO<sub>2</sub>/kWh. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)



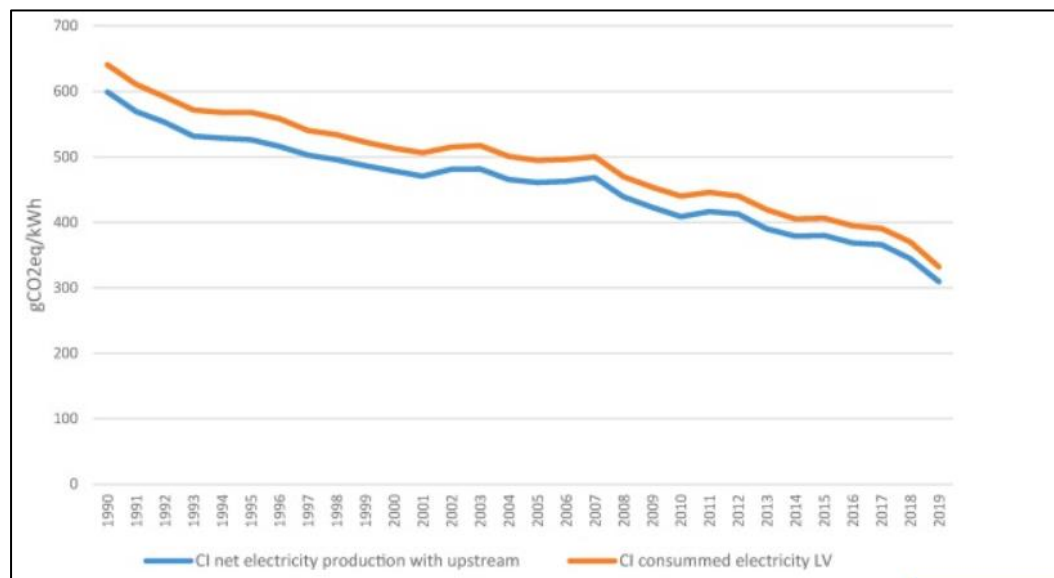
Εικόνα 3-7 Εκπομπές άνθρακα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

Ένα άλλο στατιστικό που βλέπουμε [εικόνα (3-8)] είναι η τάση μείωσης των εκπομπών άνθρακα. Σε κάποιες χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της ΕΛΛΑΔΑΣ, βλέπουμε να είναι πιο εμφανής αυτή η μείωση.



Εικόνα 3-8. Τάση μείωσης εκπομπών άνθρακα μεταξύ 1990 και 2019. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

Η τάση μείωσης των εκπομπών άνθρακα φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα. Οπού αυτή η πτωτική τροχιά αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 3-9. Εξέλιξη μείωσης εκπομπών άνθρακα. (Nicolae Scarlat, χ.χ.)

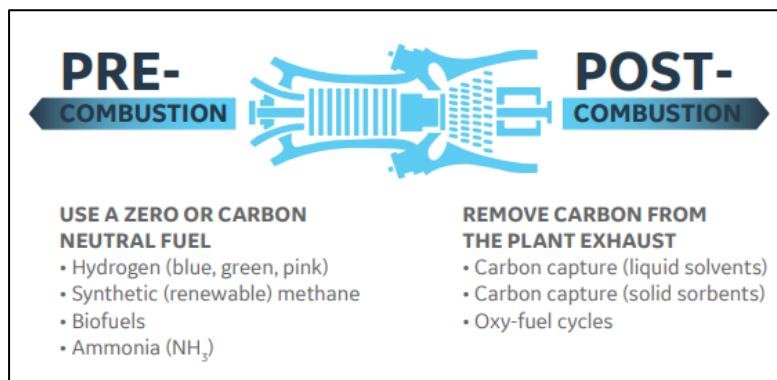
### 3.4 Τρόποι αντιμετώπισης εκπομπών άνθρακα.

#### 3.4.1 Γενικά

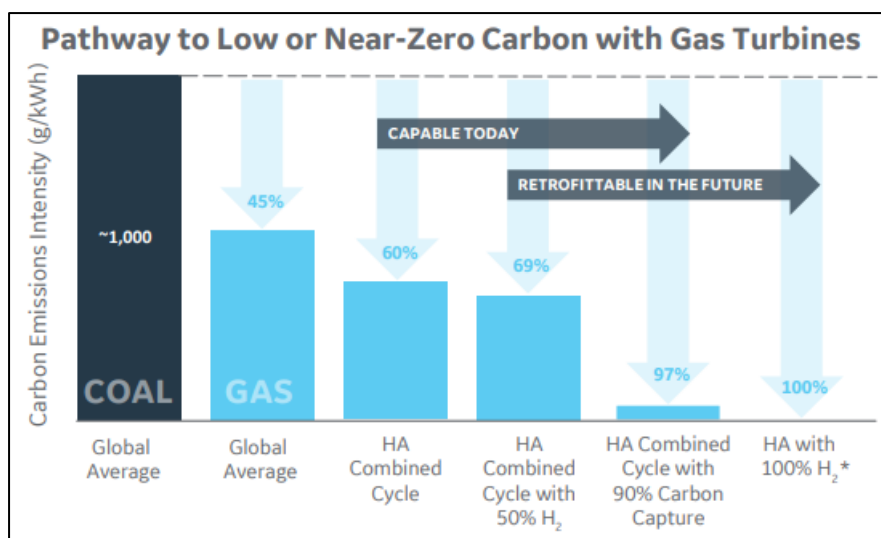
Από το 2020 μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί αεριοστρόβιλοι ισχύος 1,6 TW παγκοσμίως. Η ζήτηση φυσικού αερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσώπευε το 22% της παραγωγής παγκοσμίως.

Προκειμένου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο να μετατραπεί σε ένα σύστημα με μηδενικούς ή σχεδόν με μηδενικούς ρύπους, επιλέχθηκαν 2 τρόποι που μπορούν να το επιτύχουν.

Ένας τρόπος, είναι [εικόνα (3-8)] να αλλάξεις το καύσιμο που καίει ένα αεριοστρόβιλος από μεθάνιο  $\text{CH}_4$  ή φυσικό αέριο, σε καύσιμα χωρίς άνθρακα όπως το υδρογόνο  $\text{H}_2$ .



Εικόνα 3-10. Τρόποι απανθρακοποίησης αεριοστροβίλων. (John Catillaz, 2021)



Εικόνα 3-11. Περιπτώσεις απανθρακοποίησης αεριοστροβίλων. (John Catillaz, 2021)

Ένας άλλος τρόπος για μηδενικούς ρύπους είναι με ένα ειδικό χημικό, (αμμίνη), το οποίο ξεπλένει τα καυσαέρια που προέρχονται από την εκτόνωση του στροβίλου. Με αυτή τη διαδικασία το CO<sub>2</sub> κατακρατείται και στη συνέχεια με ένα συμπιεστή το συμπιέζουμε. Αφού έχει συμπιεστή το διοξείδιο του άνθρακα μεταφέρεται σε κοιλάτητες μέσα στη γη όπου γίνεται ταφή, ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλες διαδικασίες μέσα στην εγκατάσταση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Carbon Capture and Utilization or Sequestration (CCUS).

### 3.5 Διαδικασία λειτουργίας CCUS

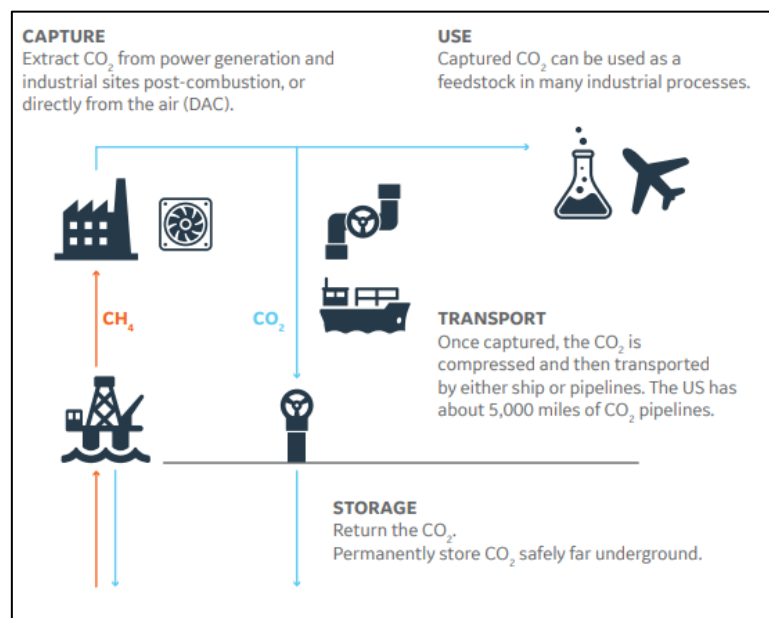
Η διαδικασία της μονάδας CCUS είναι απλή. Γίνεται η αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια, τα οποία προέρχονται από βιομηχανικές ή ηλεκτροπαραγωγικές διαδικασίες. Αυτή η διαδικασία έχει 4 βήματα:

- Δέσμευση
- Συμπύεση
- Μεταφορά
- Ταφή

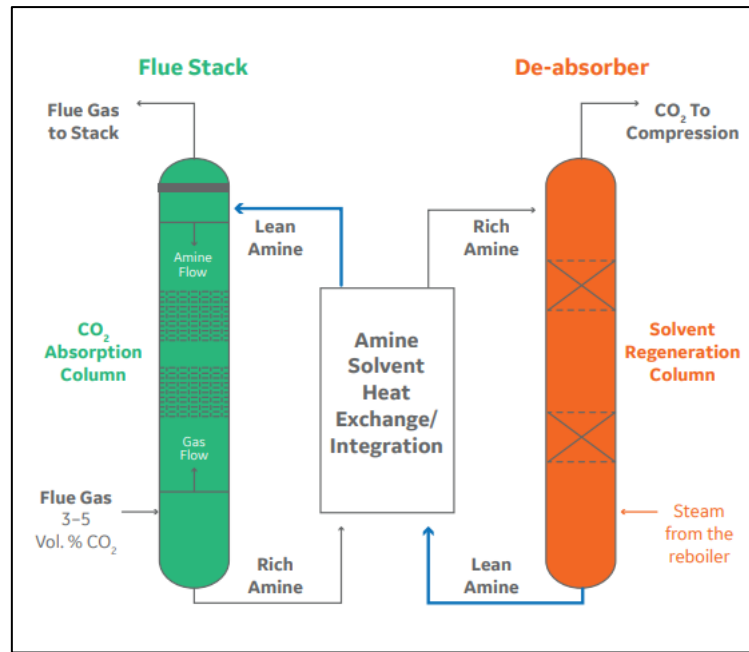
Για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής υπάρχουν αρκετές λύσεις μέσα από ένα χαρτοφυλάκιο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγροί διαλυτές, η στερεοί απορροφητές.

Αφού γίνει η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα στη συνέχεια συμπιέζεται και οδηγείται μέσω σωλήνων στο χώρο ταφής του ή σε άλλους βιομηχανικούς χώρους για επαναχρησιμοποίηση του. Το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται γενικά για την παραγωγή σύνθετων καυσίμων, χημικών, και οικοδομικών υλικών.

Για να επιτευχθεί η διαδικασία όπως είπαμε χρησιμοποιούμε τις περισσότερες φορές μια τεχνολογία που ονομάζεται (AMINE CARBON). Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει ένα ειδικό χημικό υγρό που ονομάζεται monoethanolamine (MEA), όπου ουσιαστικά μέσα ένα δοχείο ρίχνεται από την κορυφή του και ξεπλένει τα καυσαέρια τα οποία εισέρχονται από τον πάτο. Στη συνέχεια η MEA οδηγείται σε ένα άλλο δοχείο όπου θερμαίνεται και απελευθερώνει το CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια το CO<sub>2</sub> οδηγείται για συμπύεση και από εκεί για περεταίρω χρησιμοποίηση σε άλλους τομείς ή ταφή. [Εικόνα (3-11/12)]



Εικόνα 3-12. Κύκλος ζωής του άνθρακα σε μια μονάδα CCUS. (John Catillaz, 2021)



Εικόνα 3-13. Διαδικασία επεξεργασίας αμίνης. (John Catillaz, 2021)



## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-4. Αεριοστρόβιλος

### 4.1 Αρχή λειτουργίας αεριοστρόβιλου.

Η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου περιγράφεται εν συντομία ως εξής: ο αέρας αναρροφάται από την εισαγωγή (intake) και συμπιέζεται από τον συμπιεστή (compressor) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση του αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας οδηγείται στον θάλαμο καύσης (combustion chamber ή burner), ταυτόχρονα ψεκάζεται το καύσιμο το οποίο αναφλέγεται. Στη συνέχεια τα αέρια της καύσης εκτονώνονται στον στρόβιλο (compressor turbine), όπου μέρος του έργου των καυσαερίων τον περιστρέφουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μέσω ενός άξονα που συνδέει τον συμπιεστή, να περιστρέφεται ο συμπιεστής. Το έργο των καυσαερίων στους αεροπορικού τύπου κινητήρες, με την βοήθεια ενός ακροφυσίου, έχει ως αποτέλεσμα την προωθητική κίνηση. Ενώ σε αεριοστρόβιλους βιομηχανικού τύπου το έργο αυτό μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και περιστρέφει μια γεννήτρια όπου παράγεται ρεύμα ή κάποιο άλλο εξάρτημα που θέλουμε να περιστρέψουμε. Σε περίπτωση που το έργο που παραγόταν από τον στρόβιλο ήταν ίσο με το καταναλισκόμενο έργο του συμπιεστή, δεν θα είχαμε περισσευούμενο έργο και αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα, απλώς τη λειτουργία του συστήματος στροβίλου - συμπιεστή. Για να έχει νόημα η λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου πρέπει η ενέργεια των καυσαερίων να καλύπτει τις ενεργειακές μας ανάγκες. Για να συμβεί η παραπάνω συνθήκη πρέπει να συμβούν τα παρακάτω. (Πολυζάκης, 2017)

- Ο εισερχόμενος ατμοσφαιρικός αέρας πρέπει να συμπιεστεί ούτως ώστε να αυξηθεί η πυκνότητά του. Ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης όπου παρουσία του καυσίμου αναφλέγεται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και τον όγκο των καυσαερίων. Τα διογκωμένα και υψηλής ενέργειας καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο, με τη σειρά του ο στρόβιλος παραλαμβάνει αυτή την ενέργεια για να κινηθεί τον συμπιεστή, ενώ η περισσεύουσα ενέργεια μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. (Πολυζάκης, 2017)
- Ένας άλλος τρόπος είναι η προσθήκη επιπλέον καυσίμου, αλλά εδώ υπάρχει ένα όριο που είναι ο λόγος αέρα/καυσίμου. Που για δεδομένη παροχή αέρα

περιορίζει το μέγεθος του ωφέλιμου έργου. Η μέγιστη τιμή του λόγου καυσίμου/αέρα (Fuel Air Ratio, FAR) επηρεάζεται από τις συνθήκες καύσης και από την μέγιστη θερμοκρασία που εισέρχονται τα καυσαέρια στον στρόβιλο (Turbine Entry Temperature, TET ή Turbine Inlet Temperature, TIT). Οπού η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει να υπερβαίνει τη κρίσιμη τιμή. Κάποιες φορές αντί για TET μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία ακριβώς στην πρώτη σειρά των σταθερών πτερυγίων του στροβίλου, (Stator Outlet Temperature, SOT). Η θερμοκρασία αυτή είναι μικρότερη της TET, και αυτό συμβαίνει διότι στην πρώτη σειρά των σταθερών πτερυγίων μεσολαβεί παροχή ψύξης. Η ψύξη υπάρχει για να διασφαλιστεί η αντοχή των πτερυγίων και μέγιστη επιθυμητή διάρκεια ζωής του αεριοστρόβιλου. Η TET είναι η μέγιστη τιμή του θερμοδυναμικού κύκλου. (Πολυζάκης, 2017)

Συνοπτικά οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου και καθορίζουν την απόδοση του είναι: (Πολυζάκης, 2017)

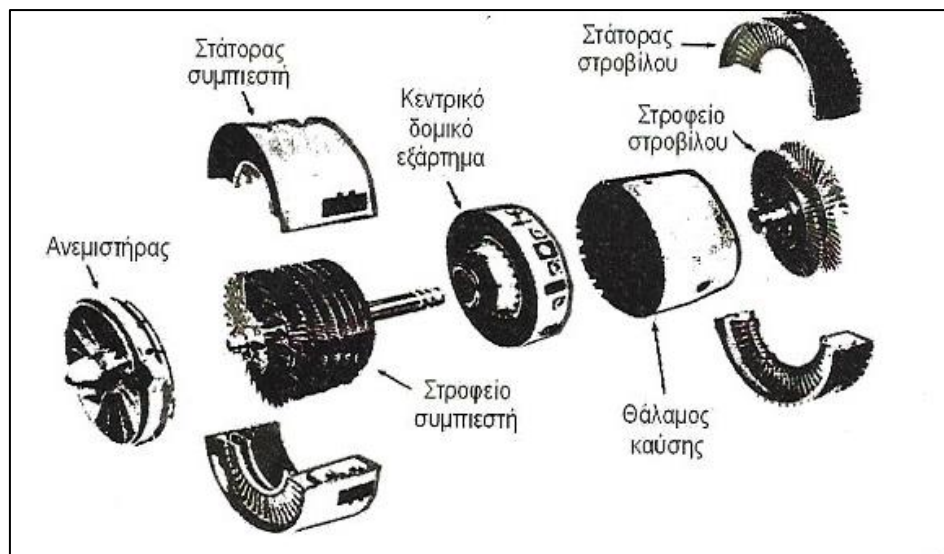
- Η θερμοκρασία λειτουργίας TET, (όπου εξαρτάται από την παροχή καυσίμου  $\dot{m}_f$ ).
- Ο λόγος πίεσης του συμπιεστή  $R_c$ .
- Η διάμετρος της εισαγωγής που επηρεάζει την παροχή αέρα,  $\dot{m}$ .
- Η απόδοση ( $\eta$ ) κάθε τμήματος
- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες.

#### 4.2 Τα κύρια εξαρτήματα των αεροστροβίλων.

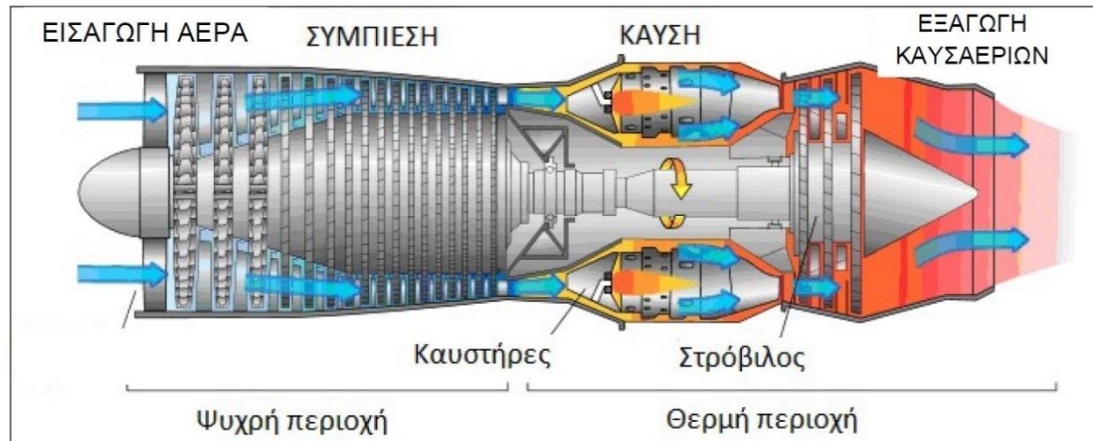
Όλοι οι αεροστροβίλοι λειτουργούν με βάση το θεωρητικό θερμοδυναμικό κύκλο Brayton. Αυτό ισχύει και για τους κινητήρες ώσης αλλά και για τους κινητήρες ισχύος.

Τα κύρια εξαρτήματα είναι:

- Τμήμα εισαγωγής (Intake)
- Συμπιεστής (Compressor)
- Θάλαμος καύσης (Combustion Chamber)
- Στρόβιλος (Turbine)
- Τμήμα εξαγωγής (Exhaust Nozzle)
- Περίβλημα (Casing)
- Θερμικοί εναλλάκτες (Heat exchanger, Intercooler)



Σχήμα 4-1. Αεριοπαραγωγός (Πολυζάκης, 2017)



Σχήμα 4-3. Τομή αεροστροβίλου. (Valadis, 2015)

#### 4.2.1 Σύστημα εισαγωγής.

Ο αεροστρόβιλος ανοικτού τύπου χρειάζεται συνέχεια ανανέωση του ατμοσφαιρικού αέρα που εισέρχεται σε αυτόν. Για το λόγο αυτό, όπου εφαρμόζονται τέτοιου είδους κινητήρες (αεροπλάνα, πλοία, βιομηχανίες), πρέπει να έχουν έναν αγωγό εισαγωγής (intake duct) που υπάρχει πριν από την εισαγωγή. (Πολυζάκης, 2017)

#### 4.2.2 Συμπιεστής.

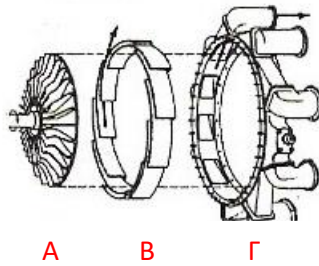
Ο συμπιεστής βρίσκεται μετά το σύστημα εισαγωγής του αεροστροβίλου. Από εκεί εισέρχεται ο αέρας ο οποίος συμπιέζεται πριν μπει στον θάλαμο καύσης. Ο συμπιεστής απαρτίζεται από έναν αριθμό βαθμίδων (stages). Οι αξονικές ταχύτητες του αέρα κατά της διάρκεια της συμπίεσης φτάνουν τα  $150 - 200 \text{ km/h}$ , ενώ η παροχή αέρα τα  $500 \text{ kg/s}$ . Η λειτουργία του συμπιεστή έχει άμεση επίδραση στη λειτουργία και απόδοση του αεροστροβίλου.

Οι συμπιεστές χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Φυγοκεντρικής ροής.

Ο φυγοκεντρικός συμπιεστής (centrifugal compressor) αποτελείται από μια ή δυο βαθμίδες. μπορεί να περιστραφεί μεταξύ  $20.000 - 90.000 \text{ rpm}$ . Αποτελείται από τρία μέρη: το στροφείο ή ρήτορας ή impeller, το διάχυτη (diffuser), και σε ορισμένες

περιπτώσεις την πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής. Η βαθμίδα του φυγοκεντρικού συμπιεστή παρουσιάζει υψηλό λόγο συμπίεσης (3,5: 1 ή 4: 1) σε σχέση με αυτήν του αξονικού. Η τοποθέτηση παραπάνω βαθμίδων είναι ασύμφορη λόγω των αυξανόμενων απωλειών ενέργειας ροής, αυτό συμβαίνει διότι έχει μεγάλη μεταβολή η κατεύθυνση ροής του αέρα. Το γεγονός της μη χρήσης παραπάνω βαθμίδων έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μικρός ολικός λόγος συμπίεσης της τάξης του 15: 1. (Πολυζάκης, 2017)



A: στροφέιο

B: διάχυτης

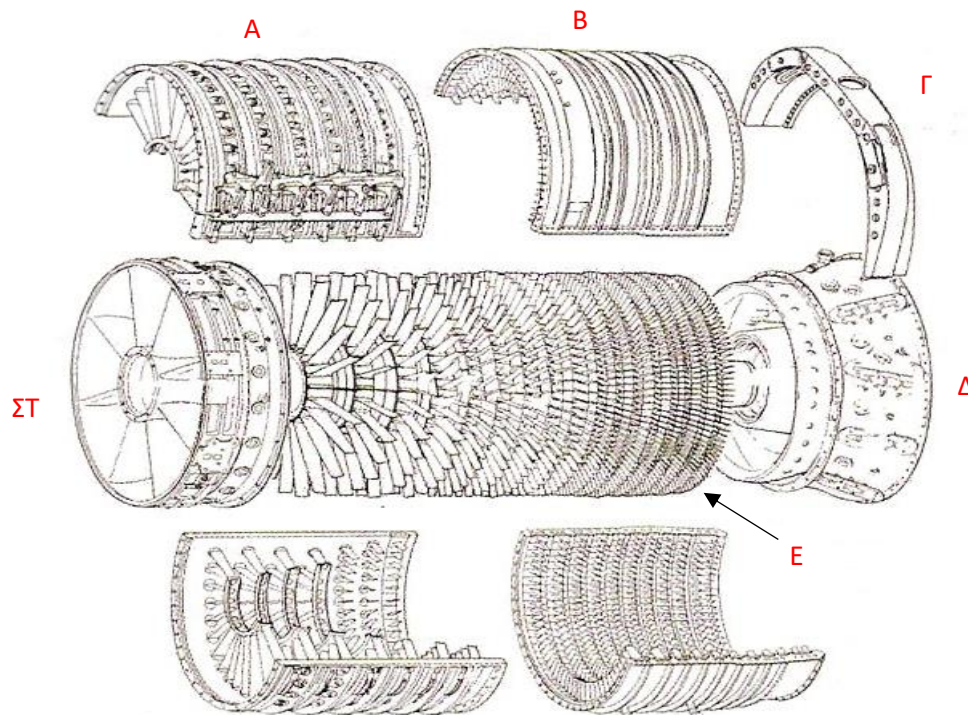
Γ: πολλαπλή σωλήνωση εξαγωγής

Σχήμα 4-4. Φυγοκεντρικός συμπιεστής. (Πολυζάκης, 2017)

#### ➤ Αξονικής ροής

Ο αξονικός συμπιεστής (axial compressor), αποτελούμενος από πολλές βαθμίδες (8-20) και εκμεταλλευόμενος την ορμή του εισερχομένου αέρα μπορεί να δώσει υψηλούς ολικούς λόγους συμπίεσης. Περιστρέφεται σε ένα φάσμα στροφών 10.000 – 30.000 *rpm*, ενώ λόγο της μικρής μετωπικής επιφάνειας μπορεί να συμπιέζει μεγάλες ποσότητες αέρα. Τα τυπικά χαρακτηριστικά του αξονικού συμπιεστή είναι: (Πολυζάκης, 2017)

- Αναρρόφηση ατμοσφαιρικού αέρα με παροχή μάζας  $\dot{m} = 150 \text{ kg/s}$ , και ταχύτητα  $\approx 0,4M$ .
- Διαβατικός (Ισεντροπικός) βαθμός απόδοσης 0,80 – 0,93
- Λόγος συμπίεσης 1,30-1,45 ανά βαθμίδα, 10-10 ανά τυμπανο, 25-35 ανά συμπιεστή και 40-45 ολικό λόγο συμπίεσης.



Σχήμα 4-5. Τομή αξονικού πολυβάθμιου συμπιεστή. *A*: εμπρός τμήμα στάτορα συμπιεστή, *B*: πίσω τμήμα στάτορα συμπιεστή, *Γ*: τμήμα κεντρικού δομικού εξαρτήματος, *Δ*: πίσω πλαίσιο συμπιεστή, *E*: στροφείο συμπιεστή, *ΣΤ*: εμπρός πλαίσιο συμπιεστή. (Πολυζάκης, 2017)

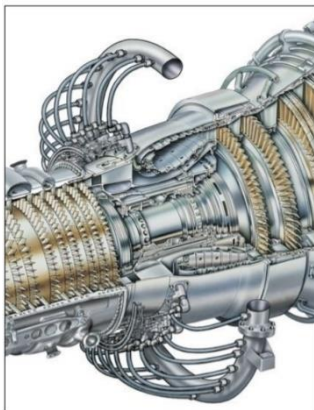
Τα υλικά κατασκευής των τμημάτων που αποτελούν τον συμπιεστή πρέπει να είναι κατασκευασμένα ούτως ώστε να αντέχουν σε υψηλές πιέσεις, και σε υψηλές θερμοκρασίες που παρουσιάζονται κατά την φάση της συμπίεσης του αέρα. Επίσης πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες φυγοκεντρικές δυνάμεις καθώς και στην αναρρόφηση ξένου σώματος, για αυτό δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στη μελέτη κατασκευής τους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κράματα αλουμίνιου, χάλυβα, νικελίου ή τιτάνιου, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας που βρίσκεται κάθε πτερύγιο.

#### 4.2.3 Θάλαμος καύσης.

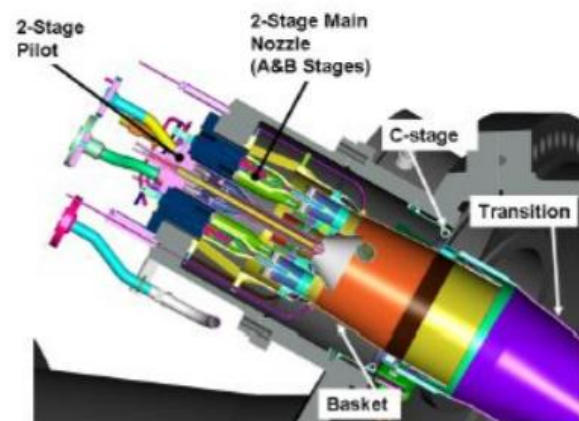
Στον θάλαμο καύσης οι συνθήκες λειτουργίας είναι ένα μίγμα αέρα/καυσίμου πολύ φτωχό. Για να έχουμε ανάφλεξη και διατήρηση της καύσης τότε ο λόγος αέρα/καυσίμου (Air/Fuel Ratio, AFR), πρέπει να είναι μεταξύ 8:1 έως 30:1. Η αναλογία αυτή θέλαμε να παρουσιάζεται τοπικά στην κύρια ζώνη καύσης. Στην πραγματικότητα όμως αν δούμε συνολικά τον θάλαμο καύσης τότε ο λόγος αέρα/καυσίμου είναι 50:1 έως 70:1. (Πολυζάκης, 2017)

Ο αέρας εισέρχεται στον θάλαμο καύσης με ταχύτητα περίπου  $150 - 200\text{m/s}$ . Με τις συγκεκριμένες ταχύτητες αν είχαμε καύση τότε η απώλεια πίεσης θα ήταν περίπου 25%. Για αυτό το λόγο πρέπει η ταχύτητα να μειωθεί. Για να γίνει αυτό γίνεται χρήση ενός διάτρητου δίσκου (perforated disk). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα να μειώνεται στα  $5\text{m/s}$ . (Πολυζάκης, 2017)

Επιπρόσθετα με τόσο μεγάλη περίσσεια αέρα και σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες έχουμε πολλά επιβλαβή αέρια όπως οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). για αυτό στον θάλαμο καύσης ψεκάζεται ατμός ή νερό όπου με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μείωση των εκπομπών αυτών. Επίσης αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην έχουμε απώλειες ισχύος. (Jim Noordermeer, 2016)



Εικόνα 4-2. Θάλαμος καύσης.



Εικόνα 4-1. Σύστημα ψεκασμού.

#### 4.2.4 Στρόβιλος.

Στον στρόβιλο πραγματοποιείται, κατά την εκτόνωση των καυσαερίων, η μετατροπή της ενέργειας των καυσαερίων σε μηχανική ισχύ. Οι στρόβιλοι χωρίζονται σε 2 κατηγορίες ανάλογα με το που διαθέτουν την μηχανική ισχύ.

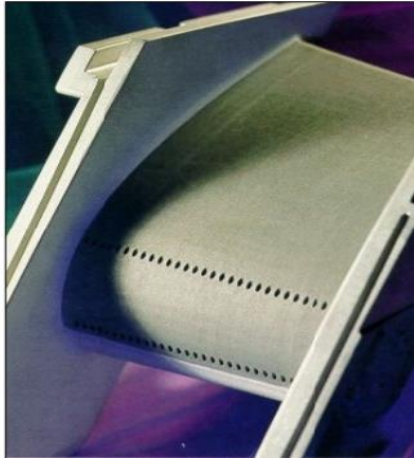
- Στρόβιλος του συμπιεστή (Compressor Turbine), ο οποίος είναι αυτός που παρέχει την ισχύ για την κίνηση του συμπιεστή αλλά και άλλων διαφόρων συστημάτων του κινητήρα.
- Στρόβιλος ισχύος (Power Turbine). Τον συγκεκριμένο τον συναντάμε κυρίως σε βιομηχανικούς αεροστροβίλους. Βρίσκεται μετά τον στρόβιλο του συμπιεστή. Συνδέονται αεροδυναμικά και όχι μηχανικά. Δηλαδή τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον στρόβιλο του συμπιεστή, συναντάνε τα πτερύγια του στροβίλου ισχύος και μέσω ενός άξονα δίνουν κίνηση σε μια γεννήτρια ή αντλία.
- Υπάρχει και η περίπτωση όπου ένας στρόβιλος λειτουργεί ταυτόχρονα, σαν στρόβιλος συμπιεστή και σαν ισχύος, δίνοντας κίνηση και στον συμπιεστή και σε εξωτερικό φορτίο.

Ο Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου είναι περίπου 0,87-0,97, και ο λόγος εκτόνωσης ανά βαθμίδα είναι 2,0-2,4, ο οποίος είναι λίγο μεγαλύτερος από αυτόν του συμπιεστή.

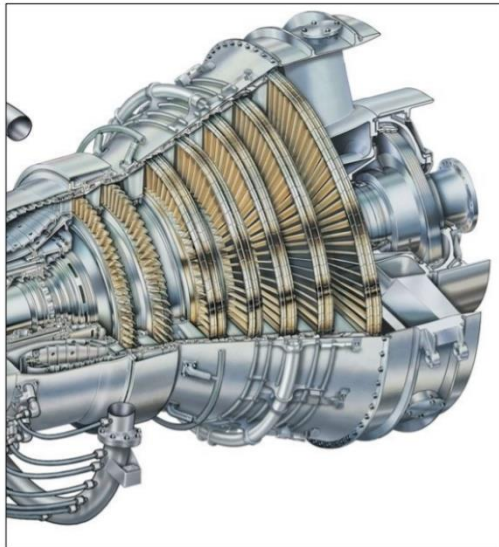
Οι συνθήκες λειτουργίας του στροβίλου είναι εξαιρετικά ακραίες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των μεγάλων στερηθικών και φυγοκεντρικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Για αυτό το λόγο τα υλικά που κατασκευάζονται τα πτερύγια είναι σιδηρούχα ή ωστενίτικα κράματα με βάση το νικέλιο ή το τιτάνιο. (Ωστενιτης, 2019) Σε κάποιες περιπτώσεις εφαρμόζονται πυρίμαχες επιστρώσεις από σύγχρονα κεραμικά υλικά όπως το νιτρίδιο και το καρβίδιο του πυριτίου. (Πολυζάκης, 2017)

Επίσης μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται ούτως ώστε να μην ξεπεράσει η θερμοκρασία TET, την κρίσιμη τιμή που αντέχουν τα πτερύγια του στροβίλου, είναι μέσα από τα πτερύγια να περνάει αέρας που διοχετεύεται από τον συμπιεστή ή να περνάει ατμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ψύξη των πτερυγίων. (Jim Noordermeer, 2016)

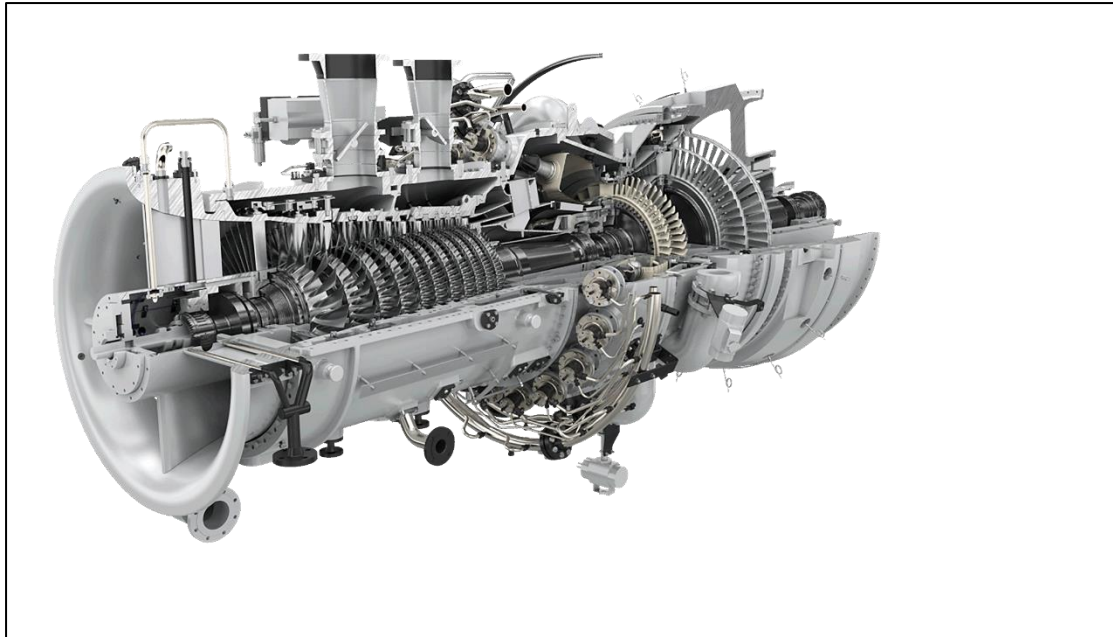




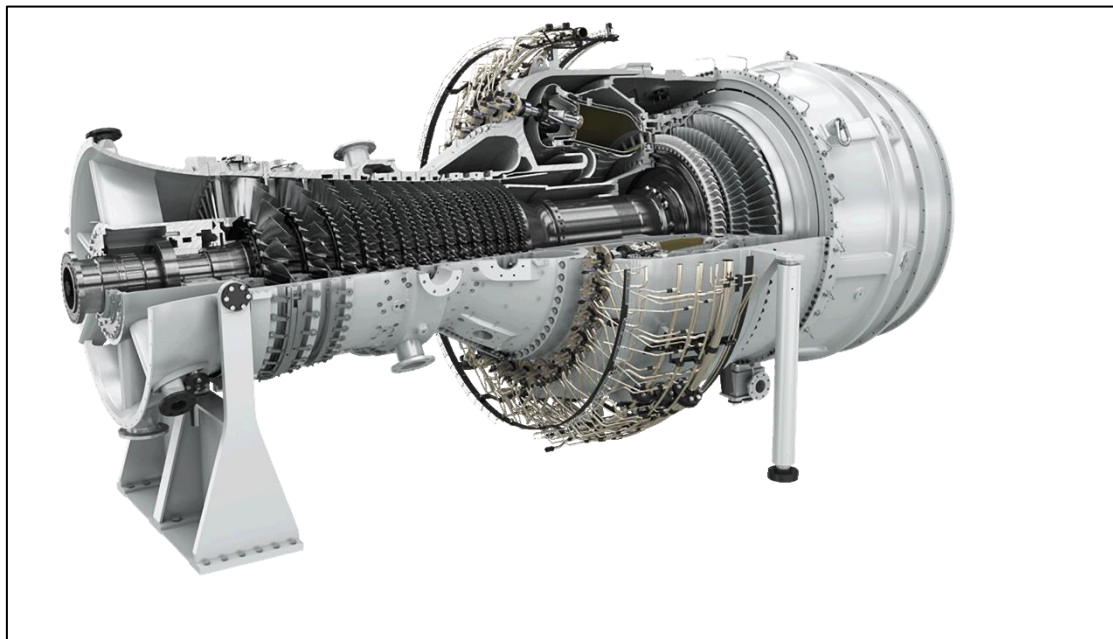
Εικόνα 4-3. Επιστρώσεις θερμικού φραγμού (TBC) που χρησιμοποιούνται για την προστασία αεροδυναμικών επιφανειών και υλικών από τη διάβρωση, οξείδωση. Πτερύγιο με οπές που περνάει αέρας ψύξης.



Εικόνα 4-4. Τομή στροβίλου. (Jim Noordermeer, 2016)



Εικόνα 4-5. Τρισδιάστατη απεικόνιση αεριοστρόβιλου Siemens SGT-700. (SIEMENS, 2022)



Εικόνα 4-6. Τρισδιάστατη απεικόνιση αεριοστρόβιλου Siemens SGT-800 (SIEMENS-ENERGY, 2022)

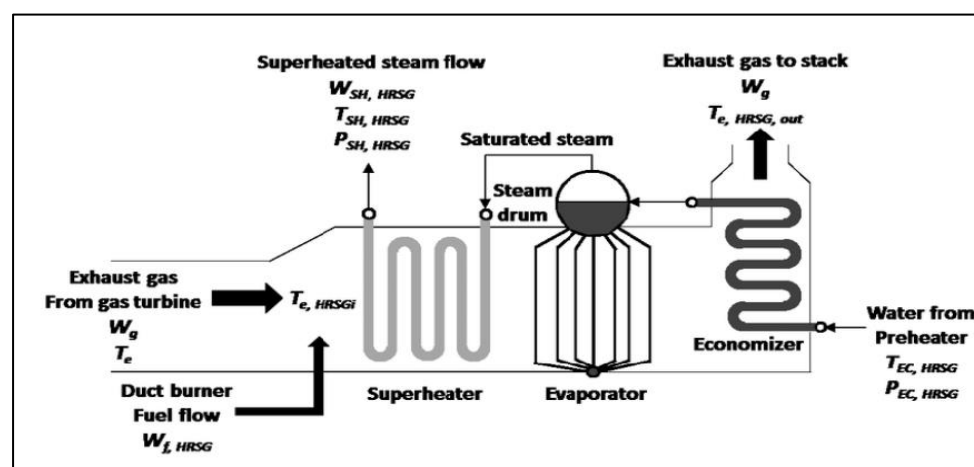
## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-5. Γεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ατμού (HRSG UNIT)

### 5.1 Τι είναι η HRSG;

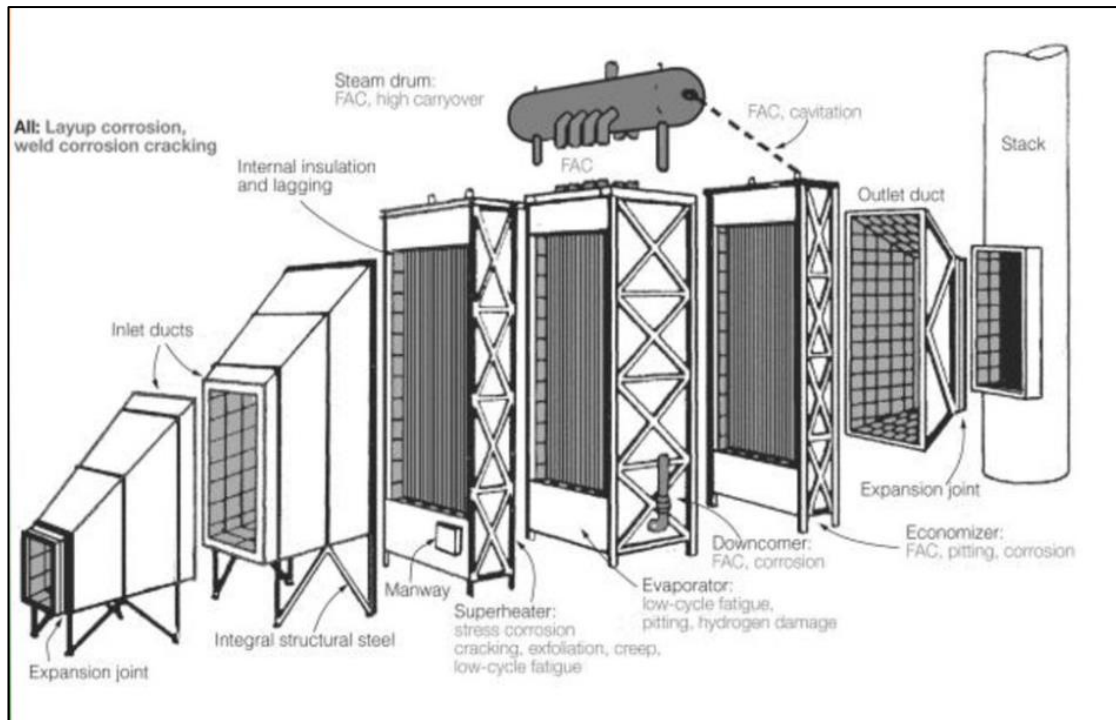
Οι γεννήτριες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούνται, ούτως ώστε να εκμεταλλευτούμε την υπάρχουσα θερμότητα (ενέργεια) που υπάρχει στα καυσαέρια, για την παραγωγή ατμού. Είναι τοποθετημένες μετά από τον αεριοστρόβιλο. Με αυτή την εφαρμογή καθίσταται ο συνδυασμένος κύκλος πιο αποδοτικός. Στην δικιά μας περίπτωση που εξετάζουμε η γεννήτρια χρησιμοποιείται για παραγωγή ατμού όπου θα χρησιμοποιηθεί σε διάφορες διεργασίες που χρειάζεται η βιομηχανία. (Πολυζάκης, 2017)

Χαρακτηριστικό όλων των HRSG είναι ότι χωρίζονται σε τμήματα (εναλλάκτες θερμότητας) και κάθε ένα κάνει μια διαφορετική διεργασία, που σαν τελικό αποτέλεσμα έχουμε την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Η HRSG αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Οικονομητήρας (economizer). Εκεί γίνεται η προθέρμανση του νερού.
- Ατμοποιητής (vaporator). Εκεί γίνεται η ατμοποίηση του νερού.
- Υπερθερμαντήρας (superheater). Στο συγκεκριμένο τμήμα γίνεται η υπερθέρμανση του ατμού.
- Τύμπανο ατμού, μπουγέλα (drum). Εκεί γίνεται ο διαχωρισμός του νερού από τον ατμό. Βρίσκεται ενδιάμεσα από τον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντήρα.



Σχήμα 5-1. Διάγραμμα γεννήτριας ατμού. (Kim, 2014)



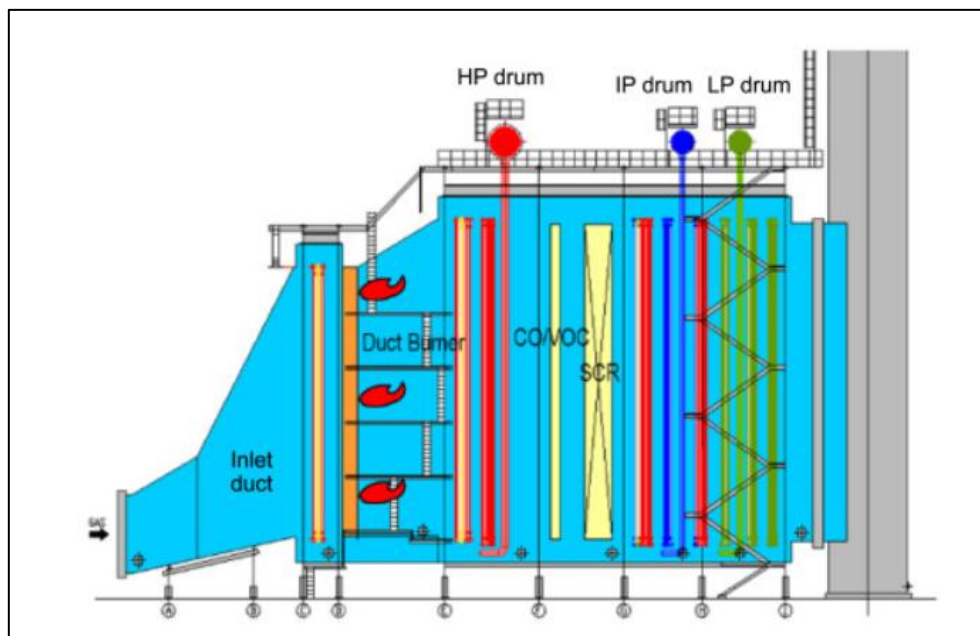
Σχήμα 5-2. Μονάδα HRSG (SUBBARAO, n.d.)

## 5.2 Κατηγορίες γεννητριών ανάκτησης θερμότητας.

Παρακάτω θα δούμε ορισμένες κατηγορίες HRSG.

### 5.2.1 Μονάδα ανάκτησης θερμότητας με καύση.

Η απόδοση μια τέτοιας μονάδας εξαρτάται από τη θερμότητα εξαγωγής των καυσαερίων από τον αεριοστρόβιλο. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσής τους. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή τους είναι οι συνθήκες περιβάλλοντος, λόγω του ότι επηρεάζουν τις συνθήκες λειτουργίας του αεριοστρόβιλου. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την περεταίρω καύση καυσίμου. Αυτό πραγματοποιείται στην είσοδο της HRSG με καυστήρες. Δεν χρειάζεται να προστεθεί αέρας διότι τα αέρια του αεριοστρόβιλου έχουν μεγάλη περίσσεια. (PM, 2009)

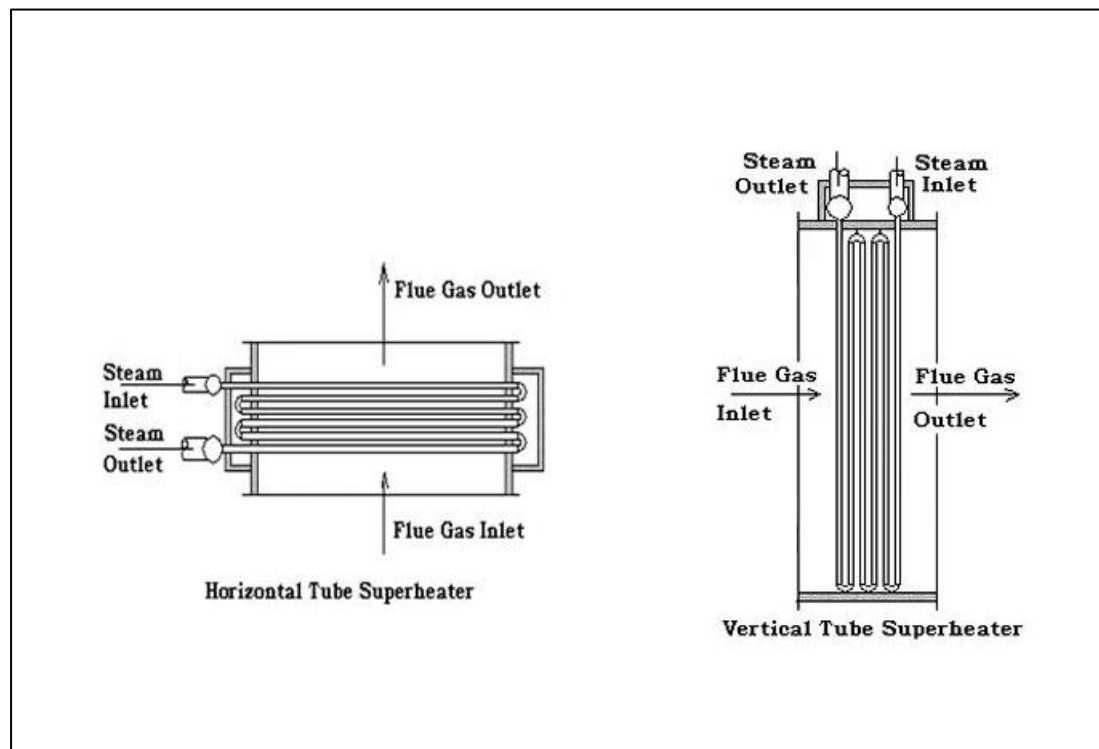


Εικόνα 5-1. HRSG με καυστήρες. (Shiozaki, 2021)

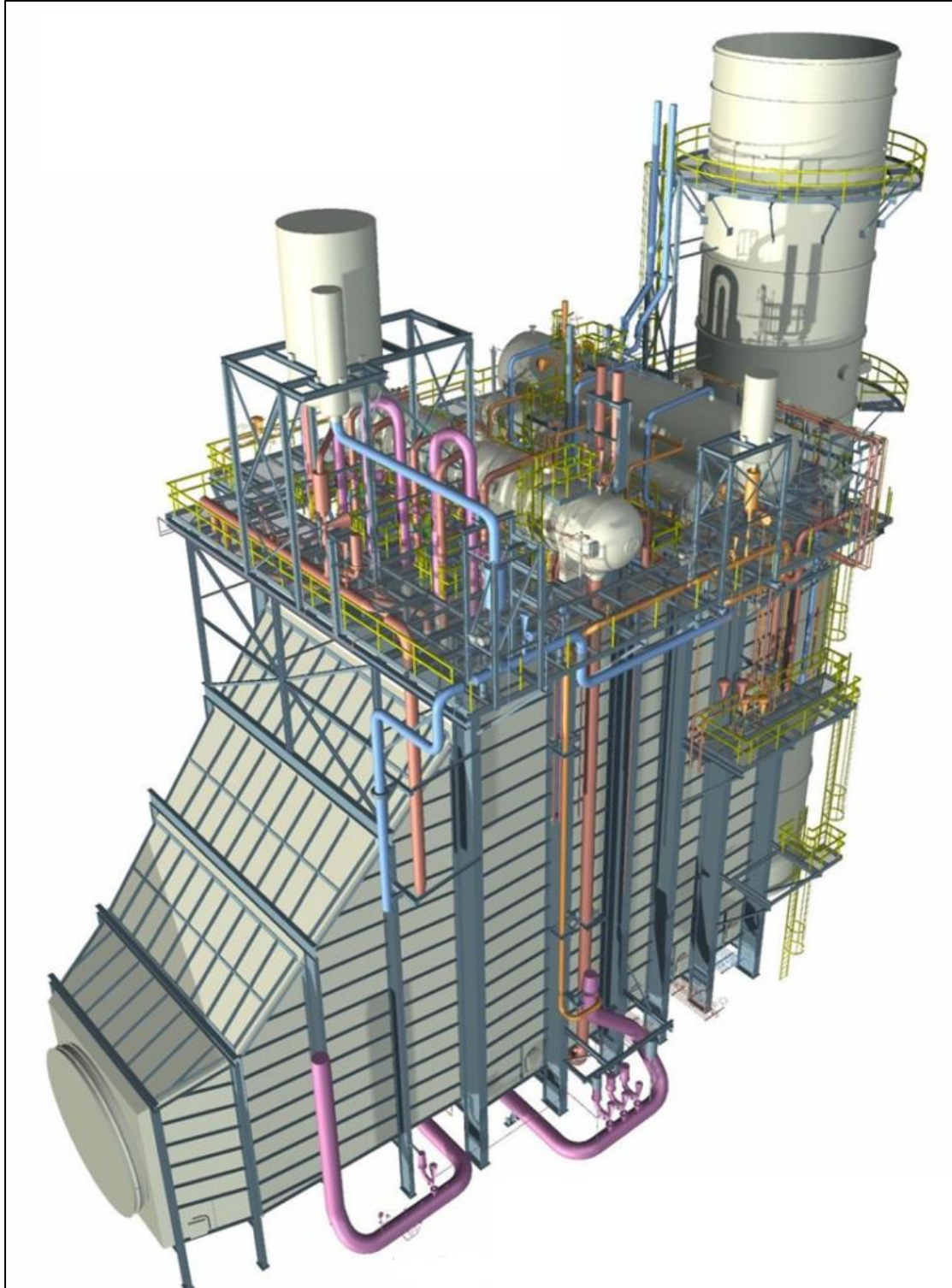
### 5.2.2 Κάθετοι και οριζόντιοι τύποι.

Μια άλλη κατηγορία που χωρίζονται οι μονάδες αυτές είναι βάσει την κατασκευή τους ή τον σχεδιασμό. Ανάλογα τη ροή του αερίου μπορεί να είναι κάθετες ή οριζόντιες. Με βάση την απόδοση και το κόστος δεν υπάρχουν διαφορές. Η επιλογή της διάταξης γίνεται βάσει τεχνικών ζητημάτων όπως χωροταξία ή τη προτίμηση του εκάστοτε πελάτη. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι οι εξής:

- Οι οριζόντιοι απαιτούν 30% μεγαλύτερο χώρο.
- Διαθέτουν περισσότερους αρμούς διαστολής.
- Στους κάθετους τύπους έχουμε υψηλότερες δομικές απαιτήσεις
- Μεγαλύτερη δυσκολία συντήρησης έχουν οι οριζόντιοι.



Σχήμα 5-3. Διάταξη μονάδων HRSG (Roumeliotis, 2012)



Εικόνα 5-2. Τρισδιάστατη απεικόνιση μονάδας HRSG (nirootavan, n.d.)

## 6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-6. Καύσιμα.

### 6.1 Φυσικό αέριο.

Με την θερμογόνο δύναμη έχουμε την ικανότητα να μετρήσουμε τη θερμική ενέργεια ενός υλικού που μπορεί να καεί. Η ενέργεια αυτή που εκλύεται κατά την καύση ενός κιλού στερεού ή υγρού καυσίμου ή ενός κυβικού μέτρου αερίου καυσίμου όταν αυτό βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες ονομάζεται θερμογόνος δύναμη. Η θερμογόνος δύναμη διακρίνεται σε κατωτέρα και ανωτέρα. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση το νερό και σε ποια κατάσταση βρίσκεται. Αν είναι σε υγρή κατάσταση, δηλαδή δεν έχει απορροφήσει ενέργεια, τότε μιλάμε για ανωτέρα θερμογόνο δύναμη. Αν αντίθετα το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί) τότε μιλάμε για κατωτέρα.

Γενικά σε υπολογισμούς λαμβάνεται η κατωτέρα διότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν τη δυνατότητα να αποβάλλουν το νερό σε μορφή ατμού που υπάρχει στα καυσαέρια.

### 6.2 Χρήσεις φυσικού αερίου.

Η χρήση του φυσικού αερίου γίνεται ολοένα και πιο ταχύτερα. Αυτό συμβαίνει διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τομείς όπως:

- Βιομηχανικός
- Εμπορικός
- Οικιακός
- Ηλεκτροπαραγωγή
- Μεταφορές
- Αυτοκινητοβιομηχανία, κλπ.



### 6.3 Πλεονεκτήματα.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα πλεονεκτήματα χρήσης του φυσικού αερίου.

- Οικονομία: Σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, το φυσικό αέριο είναι φθηνότερο. Επίσης είναι φθηνότερο σε σύγκριση με την ηλεκτρική ενέργεια όταν χρησιμοποιείται για την προμήθεια οικιακών συσκευών. Επιπρόσθετα οι συσκευές φυσικού αερίου είναι φθηνότερες από αυτές του ηλεκτρισμού.
- Περιβάλλον: Λόγω του ότι βρίσκεται σε αέρια μορφή δεν μολύνει το έδαφος ή τα υπόγεια ρεύματα. Επίσης ένα άλλο σημαντικό γεγονός είναι ότι, κατά την καύση του δεν απελευθερώνει αιθάλη ή διοξείδιο του θείου. Σε σχέση με τον άνθρακα εκπέμπει 45% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα και 30% σε σχέση με το πετρέλαιο.
- Μεταφορές: Η μεταφορά του φυσικού αερίου γίνεται είτε μέσω θαλάσσης, είτε μέσω ξηράς με αγωγούς. Αυτό επιτρέπει την εύκολη μεταφορά του στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή στα νοικοκυριά.
- Πολλαπλές χρήσεις: Το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σπίτι για μαγείρεμα θέρμανση κλπ. Επίσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την τροφοδοσία οχημάτων ( αντικαθιστώντας το diesel και τη βενζίνη). Άλλη χρησιμότητα του είναι για την παραγωγή πλαστικών και λιπασμάτων.
- Διαθεσιμότητα: Το φυσικό αέριο βρίσκεται σχεδόν σε όλο το κόσμο σε αφθονία.
- Μετατροπή σε καύσιμο υδρογόνο: Μέχρι και σήμερα η φθηνότερη πηγή ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή υδρογόνου είναι το φυσικό αέριο. (Engineering, 2011)

#### 6.4 Μειονεκτήματα.

Παρακάτω θα δούμε ορισμένα μειονεκτήματα του φυσικού αερίου.

- Εύφλεκτο και τοξικό: Λόγω του ότι είναι αέριο υπάρχουν περιπτώσεις διαρροών. Αυτές οι διαρροές μπορούν να οδηγήσουν σε πυρκαγιά ή έκρηξη. Επίσης είναι πάρα πολύ τοξικό. Επιπρόσθετα το φυσικό αέριο από τη φύση του είναι άοσμο, για αυτό το λόγο γίνεται προθήκη αρωματικών ουσιών για να μπορεί να γίνεται αντιληπτό από την οσμή.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις; Παρόλο που το φυσικό αέριο όταν καίγεται εκπέμπει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με τα άλλα συμβατικά καύσιμα, δεν παύει και αυτό με τη σειρά του, όταν καεί να απελευθερώσει ρίπους οι οποίοι συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επίσης όσο αφορά τα υποπροϊόντα, σε περιπτώσεις διαρροής, το μεθάνιο είναι 21 φορές πιο επικίνδυνο από το διοξείδιο του άνθρακα.
- Μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας; Το φυσικό αέριο βρίσκεται έτοιμο στη γη, και δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να γίνει εκ νέου παραγωγή του. Χρησιμοποιείται όσο υπάρχουν κοιτάσματα. Μέχρις ότου εξαντληθούν.
- Εγκατάσταση: Για να κατασκευάσουμε μια εγκατάσταση φυσικού αερίου θεωρείται πολύ δαπανηρή, διότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν ειδικοί σωλήνες και ειδικές δεξαμενές.
- Αποδοτικότητα στις μεταφορές: Η χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου ως καυσίμου για την κίνηση των οχημάτων, έχει ως αποτέλεσμα να διανύεις λιγότερα χιλιόμετρα, συγκριτικά με το να χρησιμοποιούσες βενζίνη.
- Μετατροπή σε καύσιμο υδρογόνο: Η παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο έχει ως μειονεκτήματα ότι η απόδοση του υδρογόνου πέφτει στο μισό συγκριτικά με την αρχική χημική ενέργεια.

Συμπεραίνοντας στο τέλος βλέπουμε ότι, παρά το γεγονός ότι έχει κάποια μειονεκτήματα, η χρήση του φυσικού αερίου από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση έχει συνολική ενεργειακή απόδοση σχεδόν 90%. Βάση αυτού βλέπουμε ότι είναι μακράν καλύτερη επιλογή καυσίμου σε σχέση με τα άλλα ορυκτά καύσιμα.

## 6.5 Σύσταση φυσικού αερίου.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ενδεικτικά από τι αποτελείται το φυσικό αέριο. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει την σύσταση του ρωσικού φυσικού αερίου.

Αέριο	Περιεκτικότητα % κ.ό	Μοριακός τύπος	Μοριακή μάζα
Μεθάνιο	98	$CH_4$	16
Αιθάνιο	0,6	$C_2H_6$	30
Προπάνιο	0,2	$C_3H_8$	44
Βουτάνιο	0,2	$C_4H_{10}$	58
Πεντάνιο	0,1	$C_5H_{12}$	72
Άζωτο	0,8	$N_2$	28
Διοξείδιο του άνθρακα	0,1	$CO_2$	44
Σύνολο	100	Μέση μοριακή μάζα	16,4
Ανωτέρα θερμογόνος δύναμη	8600 kcal/Nm <sup>3</sup> εως 9500 kcal/Nm <sup>3</sup>		

Πίνακας 6-1. Σύσταση φυσικού αερίου (ΕΛΑΘΕΣΣ, χ.χ.)

Για την υλοποίηση των υπολογισμών στην συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε η παραπάνω θερμογόνος δύναμη. Αντ' αυτού χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που δόθηκαν από την ΕΛΠΕ που δείχνουν τα τελευταία 5 χρόνια τα στοιχεία του φυσικού αερίου όπως χημική σύσταση, θερμογόνο δύναμη, ειδικό βάρος κ.α. Τα οποία απεικονίζοντε στον παρακάτω πίνακα.

Name	carbon no	Hydrogen number	Molecular weight	mole CO2	mole H2O	stoich O2	mole stoich AIR	mole Flue gas	HHV (kJ/mole)	Average composition
Methane	1	4	16	1	2	2	9,5	10,5	890,0	92,42
Ethane	2	6	30	2	3	3,5	16,7	18,2	1560,0	5,07
Propane	3	8	44	3	4	5	23,8	25,8	2220,0	0,75
iso-butane	4	10	58	4	5	6,5	31,0	33,5	2651,0	0,09
n-Butane	4	10	58	4	5	6,5	31,0	33,5	2877,0	0,11
iso-Pentane	5	12	72	5	6	8	38,1	41,1	3264,0	0,02
n-Pentane	5	12	72	5	6	8	38,1	41,1	3509,0	0,01
Nitrogen	0	0	28	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0,0	<b>1,0</b>	0,0	0,33
Carbon dioxide	1	0	44	<b>1</b>	0	<b>0</b>	0,0	<b>1,0</b>	0,0	0,05
Natural Gas 5 yr average	1,08	4,15	17,17	1,08	2,07	2,11	10,06	11,10	939,95	
Max 5 yr (5%)	1,03	4,04	16,67	1,03	2,02	2,04	9,72	10,74	907,61	
Min 5 yr (95%)	1,12	4,24	17,73	1,12	2,12	2,18	10,38	11,44	969,88	
Masses			17,17		MBair	29	301,0	331,8		
Air to fuel (mass ratio)							17,5			
Higher heating value (MJ/Nm <sup>3</sup> ) 5 yr average									41,962	
Higher heating value (MJ/Nm <sup>3</sup> ) min									40,518	
Higher heating value (MJ/Nm <sup>3</sup> ) max									43,298	

Πίνακας 6-2 Στοιχεία φυσικού αερίου. Μέσες τιμές. (ΕΛΠΕ, 2022)

Η θερμογόνος δύναμη καθώς και το μοριακό βάρος δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

Για τους υπολογισμούς θα χρησιμοποιήσουμε τη μέση τιμή της θερμογόνου δύναμης.

Η οποία σύμφωνα με τον πίνακα είναι:

$$\text{μεση τιμη } \theta. \Delta = 41962 \text{ kJ/Nm}^3$$

Και το μοριακό βάρος το οποίο είναι:

$$MB = 17,17 \text{ g/mol}$$

Στη συνέχεια θα μετατρέψουμε τη θερμογόνο δύναμη από  $\text{kJ}/\text{Nm}^3$  σε  $\text{kJ}/\text{kg}$ . Οπότε έχουμε:

1 mol έχει όγκο 22,4 lt (Υ.Κ.Σ) και ζυγίζει 17,17 g

1 kmol έχει ογκο 22,4  $\text{Nm}^3$  και ζυγίζει 17,17 kg

Άρα το 1  $\text{Nm}^3$  (1000 lt) ζυγίζει  $(\frac{17,17}{22,4}) = 0,77 \text{ kg}$

οπότε έχουμε  $41962 \text{ kJ}/\text{Nm}^3 / 0,77 (\text{kg}/\text{Nm}^3) = 54496 \text{ kJ}/\text{kg}$  (5.1)

Με τη συγκεκριμένη θερμογόνο δύναμη θα γίνουν οι υπολογισμοί.

Για την πρώτη περίπτωση μελετάται ο μονός αεριοστρόβιλος ισχύος 62,5 MW. Κατασκευαστής είναι η Siemens, και το μοντέλο είναι η SGT-800. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως τα δίνει η Siemens.

<i>Turbine data</i>		
<i>sgt – 800 siemens</i>		
<i>Power output</i>	62.5	<i>MW</i>
<i>Gross efficiency</i>	41,10%	
<i>Heat rate</i>	8759	<i>KJ/kWh</i>
<i>Speed</i>	6600	<i>rpm</i>
<i>Pressure ratio</i>	21,1	
<i>Exhaust mass flow meg</i>	135,5	<i>kg/s</i>
<i>exhaust gas temperature</i>	596	<i>°C</i>

Πίνακας 6-3. Στοιχεία αεριοστροβίλου.(SIEMENS-ENERGY, 2022)

## 7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Για την εξαγωγή των υπολογισμών μελετήθηκαν αρκετά συγγράμματα και δημοσιεύσεις στο διαδίκτυο. Διαπιστώθηκε η πολυπλοκότητα των υπολογισμών και η αλληλεξάρτηση μεταξύ των μεγεθών, ανάλογα με τις αρχικές παραμέτρους.

Για την ορθή εξαγωγή αποτελεσμάτων κατασκευάστηκε ένα υπολογιστικό φύλλο excel με τις αρχικές παραμέτρους, ως εξής:

- Αρχικά εισήχθησαν οι σταθερές και τα δεδομένα του προβλήματος
- Στη συνέχεια οι μεταβλητές
- Τέλος συμπληρώθηκαν τα υπόλοιπα κελιά.

Παρακάτω φαίνεται η μορφή του υπολογιστικού φύλλου.

Σταθερές	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
ειδική θερμότητα αέρα(498,5°C)	$c_{pa}$	1,052	$kJ/kgK$
ειδική θερμότητα αέρα(15°C)	$c_{pa}$	1,01	$kJ/kgK$
ειδική θερμότητα καυσαερίων (596 °C)	$c_{pk}$	1,03	$kJ/kgK$
σταθερά ισεντροπικής μεταβολής αέρα	$\gamma_a$	1,40	
σταθερά ισεντροπικής μεταβολής καυσαερίων	$\gamma_k$	1.41	
$(\gamma_k - 1)/\gamma_k$		0,24	
$(\gamma_a - 1)/\gamma_a$		0,289	

Πίνακας 7-1. Σταθερά μεγέθη. (software, n.d.)

Δεδομένα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
θερμοκρασία ατμού υψηλής πίεσης	$t_{s2}$	440	°C
μέση θερμογόνο δύναμη Φ.Α	$\Delta H_{NG}$	54496	$kJ/kg$
ειδική θερμότητα φυσικού αερίου	$c_{pNG}$	2,52	$kJ/kgK$
βαθμός απόδοσης καύσης	$\eta_b$	0,98	

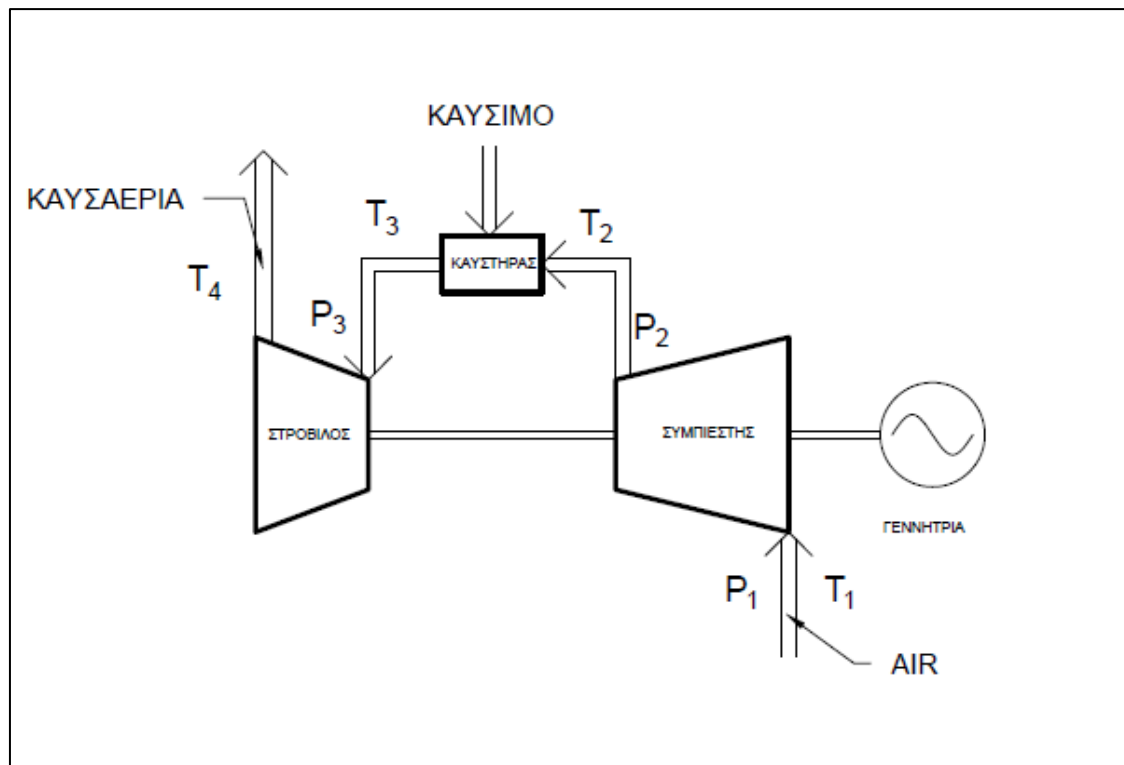
Πίνακας 7-2. Δεδομένα.

Μεταβλητές	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
θερμοκρασία καυσίμου στην <b>είσοδο</b> του εναλλάκτη	$t_1$	35	°C
θερμοκρασία καυσίμου στην <b>έξοδο</b> του εναλλάκτη	$t_2$	110	°C
θερμοκρασία αέρα στην <b>είσοδο</b> του συμπιεστή	$T_1$	23	°C
θερμοκρασία αέρα στην <b>έξοδο</b> του συμπιεστή	$T_{2π}$	498,5	°C
πίεση αέρα στην <b>είσοδο</b> του συμπιεστή	$P_1$	1,013	$bar$
πίεση αέρα στην <b>έξοδο</b> του συμπιεστή	$P_2$	21,1	$bar$
πίεση καυσαερίων στην <b>έξοδο</b> του στροβίλου	$P_{4π}$	1,98	$bar$

Πίνακας 7-3. Μεταβλητές.

Συγκεντρωτικός πίνακας συνθηκών		Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Εναλλάκτης	θερμοκρασία καυσίμου στην <b>είσοδο</b> του εναλλάκτη	$t_1$	35	$^{\circ}\text{C}$
	θερμοκρασία καυσίμου στην <b>έξοδο</b> του εναλλάκτη	$t_2$	110	$^{\circ}\text{C}$
Συμπιεστής	θερμοκρασία αέρα στην <b>είσοδο</b> του συμπιεστή	$T_1$	23	$^{\circ}\text{C}$
	πίεση αέρα στην <b>είσοδο</b> του συμπιεστή	$P_1$	1,013	$\text{bar}$
	θερμοκρασία αέρα στην <b>έξοδο</b> του συμπιεστή( $\theta$ )	$T_{2\theta}$	448	$^{\circ}\text{C}$
	θερμοκρασία αέρα στην <b>έξοδο</b> του συμπιεστή( $\Pi$ )	$T_{2\Pi}$	498,5	$^{\circ}\text{C}$
	Πίεση αέρα στην <b>έξοδο</b> του συμπιεστή	$P_2$	21,1	$\text{bar}$
Αεριοστρόβιλος	θερμοκρασία καυσαερίων στην <b>είσοδο</b> του αεριοστρόβιλου	$T_3$	1397	$^{\circ}\text{C}$
	πίεση καυσαερίων στην <b>είσοδο</b> του αεριοστρόβιλου	$P_3$	20,1	$\text{bar}$
	θερμοκρασία καυσαερίων στην <b>έξοδο</b> του αεριοστρόβιλου	$T_4$	596	$^{\circ}\text{C}$
	πίεση καυσαερίων στην <b>έξοδο</b> του αεριοστρόβιλου	$P_{4\pi}$	1,98	$\text{bar}$

Πίνακας 7-4. Συγκεντρωτικός πίνακας.



Σχήμα 7-1. Διάγραμμα μεγεθών ενός αεριοστρόβιλου.

## 7.1 ΠΙΕΣΗ-ΣΥΜΠΙΕΣΗ-ΕΚΤΟΝΩΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

### 7.1.1 Συμπιεστής

- Πίεση εισόδου:  $P_1 = 1.013 \text{ bar}$
- Πίεση εξόδου:  $P_2 = 21,1 \text{ bar}$
- Παραδοχή:
  - Θεωρούμε την θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα στον συμπιεστή  
 $T_1 = 23^\circ\text{C}$  ή  $300\text{K}$

$$\text{Λόγος συμπίεσης: } r_c = \frac{P_2}{P_1} = \frac{21,1}{1,013} = 20,8$$

- Θερμοκρασία αέρα μετά τη συμπίεση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{2\theta} = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma\alpha-1}{\gamma\alpha}} \quad [1]$$

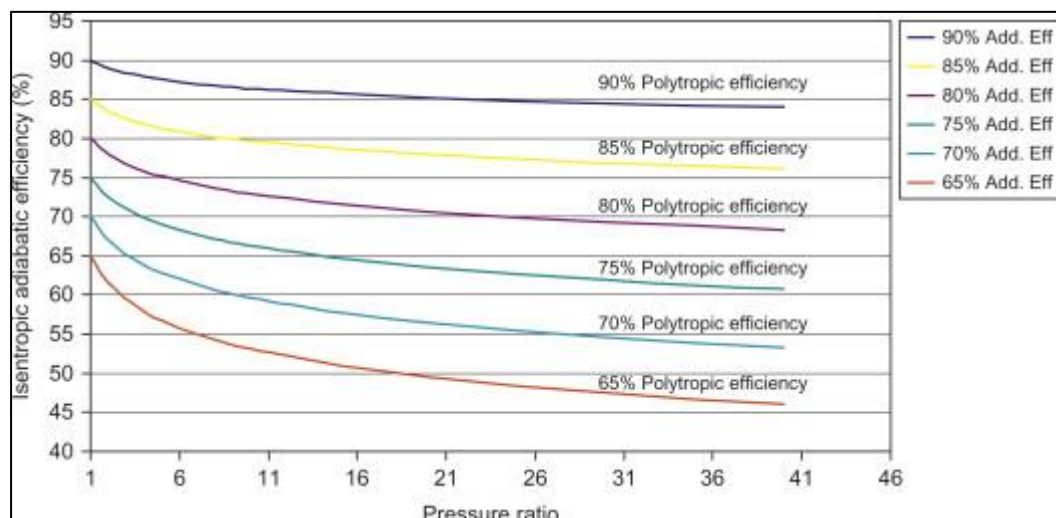
$$T_{2\theta} = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma\alpha-1}{\gamma\alpha}} = 300 \times \left(\frac{21,1}{1,013}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 714\text{K} \text{ ή } 441^\circ\text{C}$$

Ισεντροπικός συντελεστής απόδοσης συμπιεστή:

Ο Ισεντροπικός συντελεστής απόδοσης υπολογίζεται από τη σχέση  $\eta_c = 0,91 - \frac{r_c-1}{300}$

$$\eta_c = 0,91 - \frac{20,8-1}{300} = 0,844 \text{ ή } 84,4\%$$

Πολυτροπικός συντελεστής απόδοσης:



Σχήμα 7-2. Διάγραμμα πολυτροπικού βαθμού απόδοσης. (Boyce, 2011)



Επειδή η συμπίεση δεν γίνεται ισεντροπικά πρέπει να υπολογίσουμε τον πολυτροπικό συντελεστή. Ο υπολογισμός έγινε με τον παρακάτω πίνακα.

Γνωρίζοντας το λόγο συμπίεσης και τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης προκύπτει ότι ο Πολυτροπικός βαθμός είναι  $\eta_{cpol} = 90\%$  ή 0,9.

Σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο μπορούμε να υπολογίσουμε τον πολυτροπικό εκθέτη:

$$\eta_{pc} = \frac{\frac{\gamma - 1}{n - 1}}{\frac{\gamma}{n}} = \frac{\frac{1,4 - 1}{n - 1}}{\frac{1,4}{n}} \Rightarrow \frac{n - 1}{n} = \frac{1,4 - 1}{0,9} = 0,32$$

(Boyce, 2011)

Οπότε βάσει αυτού υπολογίζουμε εκ νέου τη θερμοκρασία  $T_{2\pi}$ . Η οποία είναι:

$$T_{2\pi} = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 300 * \left(\frac{21.1}{1.013}\right)^{0.32} = 513^{\circ}\text{C} \text{ ή } \mathbf{786K}$$

### 7.1.2 Θάλαμος καύσης

#### Παραδοχές:

- Θεωρούμε καύση υπό σταθερή πίεση
- Θεωρούμε απώλειες καύσης  $\eta_b$  2% (Λαμβάνεται υπόψιν στην ενεργειακή εξίσωση για τον υπολογισμό της  $T_3$ )

Πίεση θαλάμου:

Βάσει των ανωτέρω η πίεση στον θάλαμο καύσης  $P_3$  είναι:

$$P_3 = P_2 = 21.1 \text{ bar}$$

Κατανάλωση καυσίμου  $\dot{m}_{NG}$ :

Γνωρίζοντας την ωφέλιμη ηλεκτρική ισχύς ( $62,5 \text{ MW}_e$ ), (Πίνακας 6-3. Στοιχεία αεριοστρόβιλου. που έχει ο αεριοστρόβιλος καθώς και την απόδοση του (*gross efficiency* (41.1%)), μπορούμε να υπολογίσουμε τα θερμικά MW που έχουμε μέσα στο θάλαμο καύσης. Αυτός ο υπολογισμός γίνεται για να μπορέσουμε παρακάτω να υπολογίσουμε την μάζα του φυσικού αερίου που απαιτείται να καεί για να πράξουμε την ωφέλιμη ισχύς. Βάσει των παραπάνω έχουμε:

$$P_{th} = \frac{P_{el}}{\text{gross efficiency}} = \frac{62.5 \text{ MW}_{el}}{0.411} \approx 152 \text{ MW}_{th}$$

Από τη σχέση ενέργειας και ενθαλπίας καύσης μπορούμε να βρούμε την κατανάλωση καυσίμου που απαιτείται για να έχουμε 152 MW.

$$P_{th} = \dot{m}_{NG} \times \Delta H_{NG}$$

$$\text{Άρα } \dot{m}_{NG} = \frac{P_{th}}{\Delta H_{NG}} = \frac{152000 \text{ kW} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right)}{55496 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2.74 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{ ή } 9.9 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$$

Στη συνέχεια γνωρίζοντας από τον κατασκευαστή ότι ο αεριοστρόβιλος βγάζει καυσαέρια  $\dot{m}_k=135,5 \text{ kg/s}$  και έχοντας υπολογίσει την μάζα καυσίμου  $\dot{m}_{NG}=2.74 \text{ kg/s}$ ,

μέσω της σχέσης  $\dot{m}_k = \dot{m}_a + \dot{m}_{NG}$  μπορούμε να υπολογίσουμε την παροχή μάζας του αέρα που εισέρχεται στον αεριοστρόβιλο.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_k - \dot{m}_{NG} = 135.5 - 2.74 = 133 \frac{kg}{s} \text{ ή } 478 \frac{tn}{h}$$

Έχοντας βρει τον αέρα μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο αέρα καυσίμου  $f$ .

$$f = \frac{\text{παροχη αερα}}{\text{παροχη καυσιμου}} = \frac{133}{2,74} = 48.5$$

Επειδή το φυσικό αέριο πριν την είσοδο του στον θάλαμο καύσης έχει θερμοκρασία  $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , πρέπει να γίνει μια προθέρμανση. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν εναλλάκτη ο οποίος αυξάνει την θερμοκρασία του, στους  $t_2 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη στο ενεργειακό ισοζύγιο του θαλάμου.

Από το ενεργειακό ισοζύγιο στον θάλαμο μπορούμε να υπολογίσουμε, με βάσει τα παραπάνω την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον θάλαμο καύσης, μέσω του τύπου:

$$\begin{aligned} & (\dot{m}_a + \dot{m}_{NG}) * c_{pk} * T_3 \\ & = (\dot{m}_a * c_{pa} * T_2) + (\dot{m}_{NG} * LHV * \eta_b) + (\dot{m}_{NG} * c_{pNG} * (t_2 - t_1)) \end{aligned}$$

Λύνοντας ως προς  $T_3$  βρίσκουμε:

$$T_3 = 1397^\circ\text{C} \text{ ή } 1670 \text{ K}$$

Τέλος ο αέρας που έχουμε υπολογίσει είναι ο αναγκαίος ούτως ώστε η θερμοκρασία εντός του θαλάμου να είναι  $1397 \text{ }^\circ\text{C}$ . Αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία καύσης του μεθανίου σε λόγο 1:1 είναι περίπου  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Σε αυτή τη θερμοκρασία τα μέταλλα θα έλιωναν. Για να δούμε πόσο τις εκατό βάζουμε παραπάνω αέρα θα υπολογίσουμε μέσω στοιχειομετρίας τον αέρα που χρειαζόμαστε για να κάψουμε το φυσικό αέριο σε αναλογία 1:1, και εν συνεχεία θα διαιρέσουμε τις διαφορετικές ποσότητες.

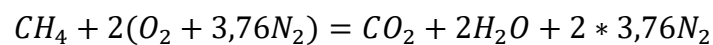
Για να υπολογίσουμε το στοιχειομετρικό αέρα που χρειάζεται για να καεί το φυσικό αέριο, χρησιμοποιήσαμε στοιχεία αναλύσεων φυσικού αερίου (μέσες τιμές) που μας παραχωρήθηκαν από την ΕΛΠΕ, των τελευταίων 5 ετών. Παρακάτω βλέπουμε τον σχετικό πίνακα τον οποίο θα αναλύσουμε.

Name	carbon no	Hydrogen number	Molecular weight	mole CO2	mole H2O	stoich O2	mole stoich AIR	mole Flue gas	HHV (kJ/mole)	Average composition
Methane	1	4	16	1	2	2	9,5	10,5	890,0	92,42
Ethane	2	6	30	2	3	3,5	16,7	18,2	1560,0	5,07
Propane	3	8	44	3	4	5	23,8	25,8	2220,0	0,75
iso-butane	4	10	58	4	5	6,5	31,0	33,5	2651,0	0,09
n-Butane	4	10	58	4	5	6,5	31,0	33,5	2877,0	0,11
iso-Pentane	5	12	72	5	6	8	38,1	41,1	3264,0	0,02
n-Pentane	5	12	72	5	6	8	38,1	41,1	3509,0	0,01
Nitrogen	0	0	28	<b>0</b>	0	<b>0</b>	0,0	<b>1,0</b>	0,0	0,33
Carbon dioxide	1	0	44	<b>1</b>	0	<b>0</b>	0,0	<b>1,0</b>	0,0	0,05
Natural Gas 5 yr average	1,08	4,15	17,17	1,08	2,07	2,11	10,06	11,10	939,95	
Max 5 yr (5%)	1,03	4,04	16,67	1,03	2,02	2,04	9,72	10,74	907,61	
Min 5 yr (95%)	1,12	4,24	17,73	1,12	2,12	2,18	10,38	11,44	969,88	
Masses			17,17		MBair	29	301,0	331,8		
Air to fuel (mass ratio)							17,5			
Higher heating value (MJ/Nm3) 5 yr average									41,962	
Higher heating value (MJ/Nm3) min									40,518	
Higher heating value (MJ/Nm3) max									43,298	

Πίνακας 7-5. Στοιχεία φυσικού αερίου. Μέσες τιμές. (ΕΛΠΕ, 2022)

Για τα 5 χρόνια του φυσικού αερίου έχουμε μια μέση τιμή της επί της εκατό σύστασης του φυσικού αερίου. Στη συνέχεια έχοντας όλα τα επιμέρους συστατικά που το αποτελούν μπορούμε να υπολογίσουμε τους άνθρακες καθώς και τα υδρογόνα που περιέχονται μέσα στο Φ.Α. Στη συνέχεια κάνοντας την εξίσωση καύσης για κάθε ένα ξεχωριστά μπορούμε να βρούμε τα mol των προϊόντων αλλά και του  $O_2$  που προκύπτουν.

Για παράδειγμα 1 mol μεθανίου  $CH_4$  όταν καίγεται με  $O_2$  παράγει 1 mol  $CO_2$  και 2 mol  $H_2O$ . Για να καεί χρειάζεται 2 mol  $O_2$ . Αλλά επειδή το  $O_2$  περιέχεται σε ποσοστό 21% στον αέρα διαιρούμε το  $2/0,21=9,5$ .



Στη συνέχεια από την παραπάνω σχέση μπορούμε να βρούμε τα mol του  $H_2O$  και του  $CO_2$ . Δηλαδή έχουμε 1 mol  $CO_2$  και 2mol  $H_2O$ .

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα συστατικά του Φ.Α και έτσι στο πίνακα έχουμε τα συγκεντρωτικά στοιχεία.

Γνωρίζοντας το μέσο όρο για στοιχειομετρικό  $O_2$  σε mol το πολλαπλασιάζουμε με το Μοριακό Βάρος του αέρα που είναι 29 και έτσι έχουμε τα kg στοιχειομετρικού  $O_2$ .

Έχοντας βρει το μοριακό βάρος του φυσικού αερίου, βάση των μοριακών βαρών των συστατικών του και της επί της εκατό περιεκτικότητας του εκάστοτε συστατικού, διαιρώντας το στοιχειομετρικό  $O_2$  και το μοριακό βάρος βρίσκουμε την στοιχειομετρική αναλογία. Οπότε έχουμε.

Μοριακό βάρος Φ.Α.(μέσο 5ετίας): 17,17 kg

Στοιχειομετρικό  $O_2$ :  $10,38 * 29 (MB_{air}) = 301$  kg

$AFR = 301/17,17 = 17,5$

Οπότε έχοντας βρει την αναλογία και γνωρίζοντας τη ποσότητα του Φ.Α, έχουμε:

Για 2,74 kg/s Φ.Α χρειαζόμαστε  $2,74 * 17,5 = 47,95$  kg/s αέρα.

Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε την περίσσεια, βάση του παρακάτω τύπου:

$$\frac{m_a - m_{στοιχ}}{m_{στοιχ}} = \frac{133 - 47,95}{47,95} = 1,77 \text{ ή } 177\%$$

### 7.1.3 Εκτόνωση καυσαερίων

Μετά τον θάλαμο καύσης τα καυσαέρια εκτονώνονται στον στρόβιλο. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων  $T_4$  θεωρείται γνωστή, σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή, (Πίνακας 6-3). Οπότε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο μπορούμε να υπολογίσουμε την πίεση των καυσαερίων στην έξοδο του αεριοστρόβιλου:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma_k-1}{\gamma_k}} = P_4 = 1.16 \text{ bar}$$

όπου  $\gamma_k = 1,4$

Η παραπάνω πίεση υπολογίστηκε προσεγγιστικά με πολυτροπικό τρόπο.

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την ισεντροπική απόδοση του στρόβιλου με τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_c = 0.90 - \frac{r_t - 1}{250} = 0.90 - \frac{\frac{P_3}{P_4} - 1}{250} = 0.90 - \frac{\frac{21.1}{1.16} - 1}{250} = 0.83 \text{ ή } 83\%$$

Βάση του παραπάνω συντελεστή και του διαγράμματος, (Σχήμα 7-2. Διάγραμμα πολυτροπικού βαθμού απόδοσης. ), έχουμε τον πολυτροπικό συντελεστή που είναι:  $\eta_{cpol} = 80\%$  ή 0,8

Οπότε βάση του παραπάνω υπολογίζουμε εκ νέου τη πίεση εξόδου των καυσαερίων  $P_{4\pi}$ . Ο υπολογισμός θα γίνει βάση του παρακάτω τύπου:

$$\eta_{cpol} = \frac{\frac{\gamma - 1}{n}}{\frac{\gamma - 1}{n}} = \frac{\frac{1,41 - 1}{n}}{\frac{1,41 - 1}{n}} \Rightarrow \frac{n - 1}{n} = \frac{1,41 - 1}{0,8} = 0,36$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_{4\pi}}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Για την υλοποίηση του παραπάνω υπολογισμού υψώνουμε και τα 2 μέρη στον εκθέτη  $\frac{n}{n-1}$ . Οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{n}{n-1}} = \frac{P_{4\pi}}{P_3} \Rightarrow P_{4\pi} = 1.98 \text{ bar}$$

$$\text{οπότε: } \frac{n}{n-1} = \frac{1}{0.36} = 2.8$$

Η πίεση εξόδου που προσδιορίστηκε είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής ενώ είναι γνωστό ότι λόγω της ύπαρξης της εστίας και της καμινάδας του λέβητα αυτή είναι στην πραγματικότητα ελαφρά (mbar) θετική ή ελαφρά αρνητική. Αν δεχθούμε ότι προσεγγιστικά είναι ατμοσφαιρική και γνωρίζοντας τις συνθήκες εξόδου (θερμοκρασία 596°C και πίεση 1.013 bar) εκτιμηθεί αντιστρόφως η θερμοκρασία καύσεως με πολυτροπικό τρόπο τότε έχουμε:

$$P_4 = 1.013 \text{ bar} \quad T_4 = 273 + 596 \text{ }^\circ\text{C} = 869 \text{ K}, \quad P_3 = 21.1 \text{ bar} \text{ τότε}$$

$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{n-1}{n}}$  όπου  $\frac{n-1}{n} = \frac{1.4-1}{1.4} = 0.286$  για ισεντροπικό εκθέτη,  $\frac{n-1}{n} = 0,36$  για πολυτροπικό εκθέτη. Οπότε βάση των παραπάνω έχουμε:

$$T_{3is} = 869 * \left(\frac{21.1}{1.013}\right)^{0.286} = 2071 \text{ K ή } 1798 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{3pol} = 869 * \left(\frac{21.1}{1.013}\right)^{0.36} = 2593 \text{ K ή } 2320 \text{ }^\circ\text{C}$$

Τα αποτελέσματα αυτά είναι και τα δύο προφανώς αδύνατο να υλοποιούνται διότι είναι εξαιρετικά υψηλά. Φαίνεται από την βιβλιογραφία ότι η μέγιστη θερμοκρασία καύσης τηρείται από 1200 έως 1400 °C και με κατάλληλα υλικά μπορεί να φθάσει τους 1600°C. Για την περίπτωση μας για να συμπέσει η πολυτροπική εκτίμηση με την εκτίμηση του ισοζυγίου απαιτείται πολυτροπική απόδοση μεγαλύτερη από 100%.

Οι εκτιμήσεις της T3 είναι εκτός αυτού του εύρους και άρα η εκτίμηση της T3 είναι προτιμότερο να γίνει με το θερμικό ισοζύγιο και τα υπόλοιπα δεδομένα του κατασκευαστή. Η εκτιμώμενη T3 με το θερμικό ισοζύγιο είναι μάλιστα η μέγιστη εκτίμηση με δεδομένες τις απώλειες του θερμικού ισοζυγίου.

Παραμένει βέβαια για έλεγχο το γεγονός ότι οι δύο αριθμοί δεν συμπίπτουν και αυτό μπορεί να οφείλεται στα δεδομένα του κατασκευαστή που είναι εξαιρετικά αισιόδοξα για την απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια του στροβίλου σε συνδυασμό με την δεδομένη ποσότητα καυσαερίων. Ωστόσο, στις αρχικές εκτιμήσεις της λειτουργίας του HRSG δεν απαιτείται η πίεση διότι οι βασικές του παράμετροι εξαρτώνται από το ισοζύγιο θερμότητας το οποίο βασίζεται στην θερμοκρασία εξόδου του στροβίλου (596°C) καθώς και στην ροή των καυσαερίων. Για το λόγο αυτό δεν γίνεται περεταίρω ανάλυση της πίεσης εξόδου και θεωρείται περίπου ατμοσφαιρική. Η τελική τιμή της πίεσης θα προσδιοριστεί μετά τον σχεδιασμό της εστίας των διαφόρων τμημάτων του λέβητα και της καμινάδας της εγκατάστασης.

## 7.2 Υπολογισμός εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub>.

Σύμφωνα με μια δημοσίευση που έγινε από τους Dr.Vladimir Navrotsky, Lena Strömberg, Claes Uebel και αφορά τον αεροστρόβιλο SGT-800. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν από τα τέλη του 2008, δηλαδή περίπου 800.000 EOH (Equivalent Operating Hours) και 8900 εκκίνησης (starts) του αεροστρόβιλου προέκυψε ότι ο συντελεστής διαθεσιμότητας του αεροστροβίλου (Availability Factor) είναι 96,5%. (Uebel, 2018)

Σύμφωνα με το παραπάνω στοιχείο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο αεροστρόβιλος είναι σε λειτουργία  $365 \frac{\text{μέρες}}{\text{χρόνο}} * 96,5\% = 352 \text{ μερες}$  ή  $352 * 24 \frac{\text{h}}{\text{μέρα}} = 8448 \text{ h}$ .

Σύμφωνα με το Πίνακας 7-5 Πίνακας 7-6. Χημική σύσταση φυσικού αερίου.έχοντας τη χημική σύσταση του φυσικού αερίου μπορούμε να υπολογίσουμε τον άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο και οξυγόνο που περιέχεται. Οπότε έχουμε:

ΧΗΜ.ΣΥΣ.	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	HC(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	ΣΥΝΟΛΟ	A.B	
	92,42%	5,07%	0,75%	0,09%	0,11%	0,02%	0,01%	0,33%	0,05%			
C:	0,9242	0,1014	0,0225	0,0036	0,0044	0,001	0,0005		0,0005	1,0581	12	12,6972
H2	3,6968	0,3042	0,06	0,009	0,011	0,0024	0,0012			4,0846	1	4,0846
N2								0,0066		0,0066	7	0,0462
O2									0,001	0,001	8	0,008
											ΣΥΝΟΛΟ	16,836
											%C	75,42%

Πίνακας 7-6. Χημική σύσταση φυσικού αερίου. (ΕΛΠΕ, 2022)

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα η περιεκτικότητα του άνθρακα στο φυσικό αέριο είναι 75,42%. Επίσης η κατανάλωση καυσίμου είναι  $9,9 \text{ tn/h}$ .(σελίδα 66) Με βάση τον παρακάτω τύπο έχουμε:

$$m_{CO_2} = \mu_{CO_2} * \dot{m}_{NG} = 0.7542 * \left(\frac{44}{12}\right) * 9.9 = 27.3 \frac{\text{tn}}{\text{h}} \text{ ή } 27.3 * 8448 \frac{\text{h}}{\text{y}}$$

$$= 230458 \frac{\text{tn}}{\text{y}}$$

Θεωρώντας ότι η εγκατάσταση δουλεύει για 8448 ώρες, τότε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι:

$$E_{el} = P_{el} * 8448 = 62.5 * 8448 \frac{\text{h}}{\text{y}} = 528000 \frac{\text{MWh}}{\text{y}} \text{ ή } 528 \frac{\text{GWh}}{\text{y}}$$



Ένα άλλο μέγεθος που υπολογίζεται είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου του αεριοστροβίλου. Το μέγεθος αυτό υπολογίζεται από το λόγο της ροής καυσίμου που καταναλώνει ο αεριοστροβίλος προς την ενέργεια που αποδίδει.

Σύμφωνα με το παραπάνω η ειδική κατανάλωση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{ειδική καταν. καυσίμου} = \frac{\dot{m}_{NG}}{E_{el}} = \frac{9.9 \frac{tn}{h} * 8448 \frac{h}{y}}{528000 \frac{MWh}{y}} = 0.16 \frac{tn}{MWh} \text{ ή } 160 \frac{kg}{MWh}$$

(ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ, 2021)

Στη συνέχεια έχοντας βρει την ποσότητα καυσαερίων  $CO_2$  που παράγεται σε ένα χρόνο λειτουργίας του αεριοστροβίλου και έχοντας υπολογίσει την αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική εκπομπή  $CO_2$ .

Βάση των παραπάνω η ειδική εκπομπή  $CO_2$ :

$$\text{ειδική εκπομπή } CO_2 = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{E_{el}} = \frac{230458 \frac{tn}{y}}{528000 \frac{MWh}{y}} = 0.44 \frac{tn}{MWh}$$

(ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ, 2021)

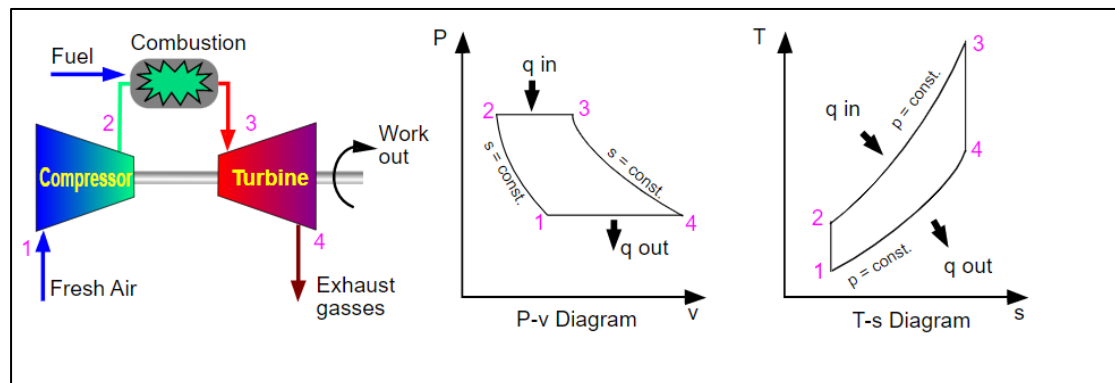
### 7.3 Θερμική απόδοση κύκλου BRAYTON.

Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση του κύκλου Brayton (Πολυζάκης, 2017). Οπότε έχουμε:

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_c^{(\gamma-1)/\gamma}} = 1 - \frac{1}{20.8^{1.4-1/1.4}} = 0,58 \text{ ή } 58\%$$

Για το ωφέλιμο έργο θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση.

Έχοντας ολοκληρώσει και βρει όλα τα σημεία του κύκλου Brayton βλέπουμε τα αποτελέσματα συγκεντρωτικά.



Σχήμα 7-3. Απεικόνιση κύκλου Brayton.

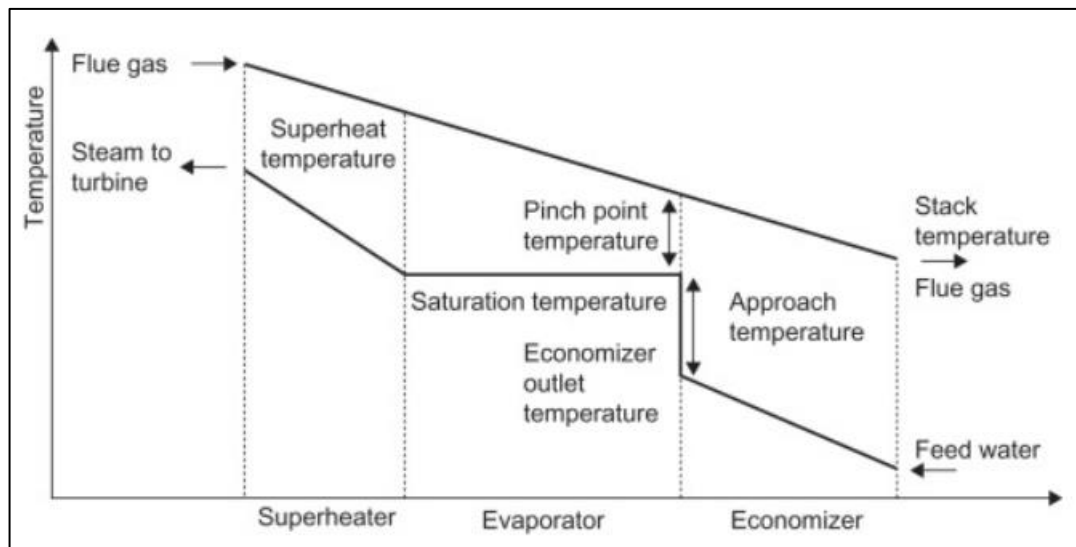
Σημείο 1	P1	1,013	bar
	T1	27	°C
Σημείο 2	P2	20,7	bar
	T2	513	°C
Σημείο 3	P3	20,3	bar
	T3	1397	°C
Σημείο 4	P4	1,98	bar
	T4	596	°C

Πίνακας 7-7. Συγκεντρωτικά στοιχεία κύκλου BRAYTON.

## 8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-8. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΤΜΟΥ

### 8.1 Εισαγωγή.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα δούμε και θα αναλύσουμε την παραγωγή ατμού με ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων. Μεγάλη σημασία εδώ έχει η θερμοκρασιακή κατανομή των ρευμάτων (καυσαέρια - νερό/ατμός), και πως εναλλάσσονται μεταξύ τους τα θερμικά φορτία. (Πολυζάκης, 2017)



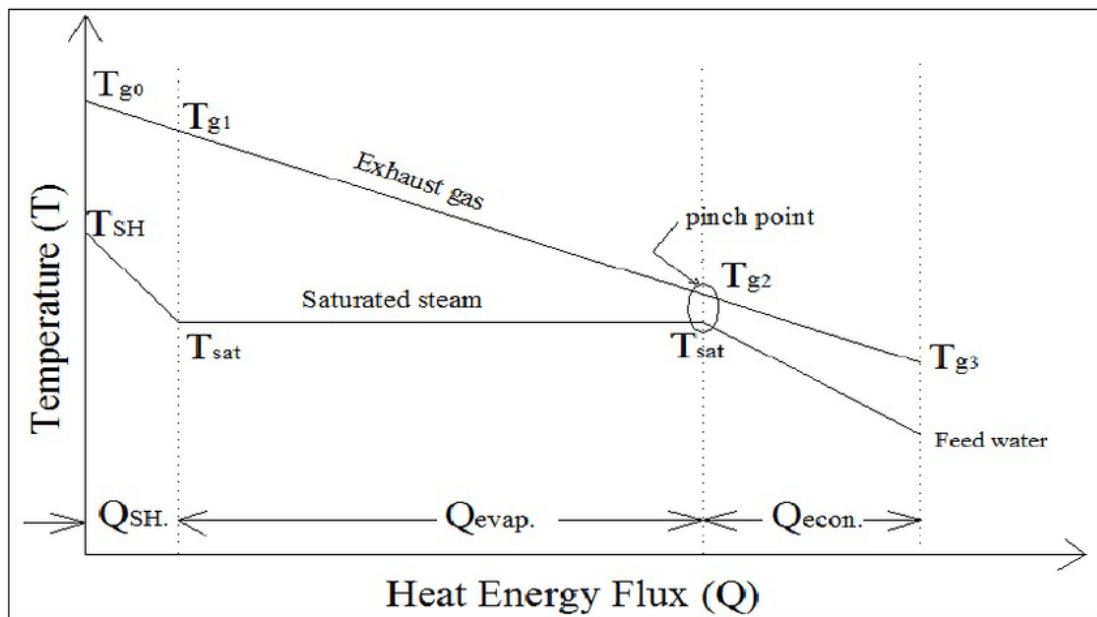
Σχήμα 8-1. Διάγραμμα μονάδας ανάκτησης θερμότητας. (Rackley, 2017)

Για την βελτιστοποίηση των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας των καυσαερίων αεριοστροβίλου, για την παραγωγή ατμού, μια μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η Pinch ανάλυση, ελάχιστης διαφοράς θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Όσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας τόσο μικρότερη είναι και η απώλεια ενέργειας. (Πολυζάκης, 2017)

Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία εισάγουμε 2 παραμέτρους ούτως ώστε να μελετήσουμε το σύστημα παραγωγής ατμού.

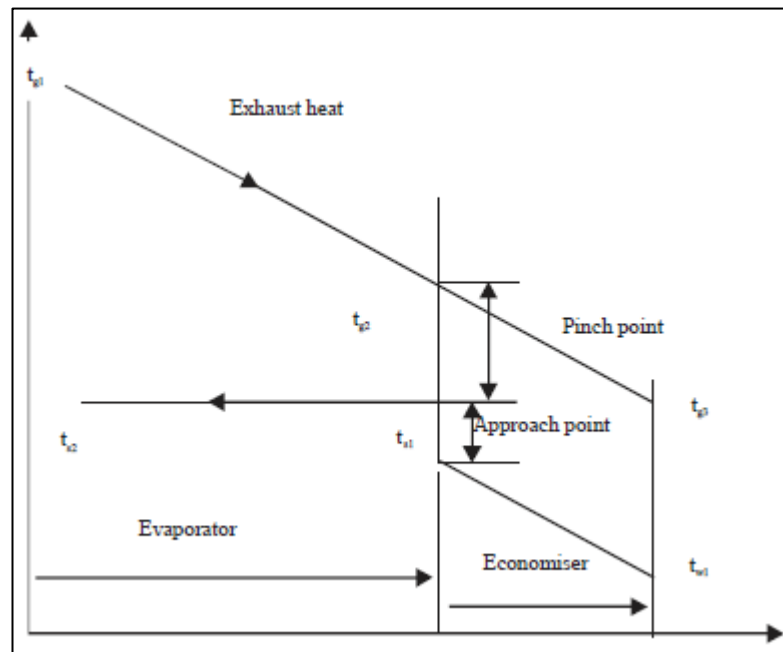
- Pinch point
- Approach point

Το Pinch point, είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εξόδου των καυσαερίων από τον εξατμιστή (Q<sub>evap</sub>)  $T_{g1}$  και της θερμοκρασίας κορεσμένου ατμού  $T_{sat}$ .  $PP = T_{g2} - T_{sat}$ , (Σχήμα 7-2). Αυτό είναι σημαντικό διότι καθορίζει την επιφάνεια εναλλαγής και την απόδοση του εναλλάκτη. (Yousri M. A. Welaya, 2013)



Σχήμα 8-2. Προσδιορισμός PP. (Yousri M. A. Welaya, 2013)

Το Approach point (AP) είναι η διαφορά θερμοκρασίας σημείου προσέγγισης, η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας κορεσμού του νερού στον εξατμιστήρα και της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τον οικονομητήρα,  $AP = t_{g2} - t_s$ , (Σχήμα7-3). (Πολυζάκης, 2017)



Σχήμα 8-3. Προσδιορισμός σημείου AP. (Meseret Nasir Reshid, 2016)

Βασική προϋπόθεση ούτως ώστε ο σχεδιασμός να είναι σωστός είναι να ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη.

$$T_{g2} > t_s \text{ και } T_{g3} > T_{\text{FEED WATER}}$$

## 8.2 Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων – θερμική ισχύς

## 8.2.1 Παραδοχές

Με βάση την ανάλυση της παραγράφου (7.1) θεωρούμε στην συγκεκριμένη μελέτη τις εξής παραδοχές:

Pinch Point:  $PP = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$

Approach Point:  $AP = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Η θερμοκρασία κορεσμένου ατμού σε πίεση 44 bar είναι  $t_s = 256^{\circ}\text{C}$

Η ενθαλπία του κορεσμένου νερού σε θερμοκρασία  $256^{\circ}\text{C}$  είναι:

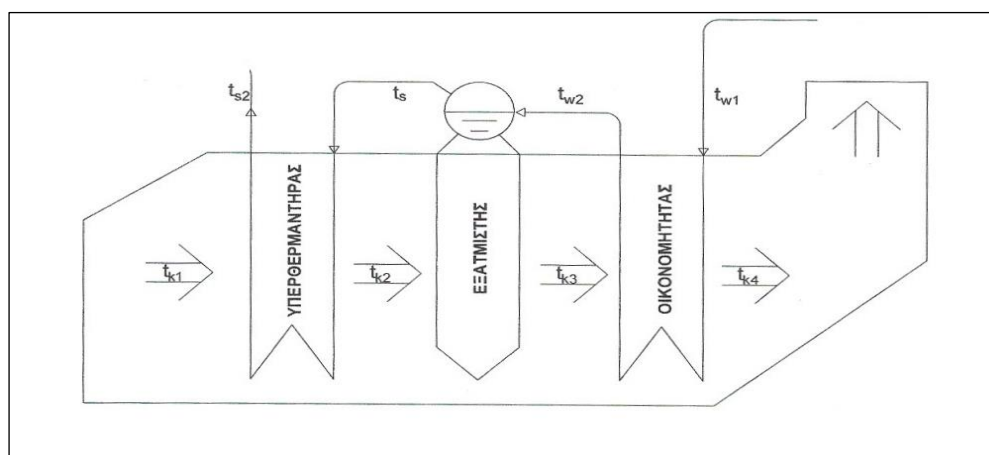
$$hw3 = 1115.4\text{ kJ/kg.}$$

Η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του υπερθερμαντήρα, σε πίεση 44 bar και θερμοκρασία  $t_{s2} = 440\text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι:  $hs2 = 3302.06\text{ kJ/kg.}$

Στον παρακάτω πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τα σύμβολα των θερμοκρασιών νερού-ατμού που χρησιμοποιούνται στους παρακάτω υπολογισμούς:

	Καυσαέρια		Νερό – ατμός	
	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
Οικονομητήρας	$tk_3$	$tk_4$	$tw_1$	$tw_2$
Εξατμιστής	$tk_2$	$tk_3$	$tw_2$	$t_s$
Υπερθερμαντήρας	$tk_1$	$tk_2$	$t_s$	$ts_2$

Πίνακας 8-1. Θερμοκρασίες εργαζομένων μέσων στη HRSG



Σχήμα 8-4. Σχηματική απεικόνιση HRSG

### 8.2.2 Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του εξατμιστή είναι:

$$tk_3 = t_s + PP = 256 + 14 = \mathbf{270^\circ C}$$

Η θερμοκρασία που εισέρχονται τα καυσαέρια στην μονάδα ανάκτησης είναι:  $tk_1 = 596^\circ C$ . Βάση αυτού η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του οικονομητήρα είναι:

$$tw_2 = t_s - AP = 256 - 5 = \mathbf{251^\circ C}$$

Γνωρίζοντας την θερμοκρασία του νερού, βρίσκουμε ότι η ενθαλπία είναι:  $hw_2 = 1090 \text{ kJ/kg}$

Το νερό το οποίο γίνεται ατμός εισέρχεται με θερμοκρασία  $tw_1 = 100^\circ C$ . Και η ενθαλπία του είναι:  $hw_1 = 423.5 \text{ kJ/kg}$ .

### 8.2.3 Συνολική ενέργεια που απορροφάται από τον εξατμιστή και υπερθερμαντήρα.

Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορροφάτε από τον εξατμιστή και τον υπερθερμαντήρα.

$$\begin{aligned} Q_{13} &= m_k * c_{pk} * (t_{k1} - t_{k3}) * f_1 = 135.5 * 1.15 * (596 - 270) * (1 - 0.01) \\ &= \mathbf{50290.96 \text{ kw} \text{ ή } 50.3 \text{ MW}} \end{aligned}$$

Οπού:

f = συντελεστής απώλειας θερμικού φορτιού 1%

$$f_1 = 1 - f$$

### 8.2.4 Υπολογισμός παραγόμενου ατμού.

Σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο, μεταξύ της ενέργειας που προσδίνεται από τα καυσαέρια και της ενέργειας που έχει ο παραγόμενος ατμός, μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγωγή ατμού που έχουμε. Σύμφωνα με την παρακάτω σχέση έχουμε:

$$Q_{13} = m_k * c_{pk} * (t_{k1} - t_{k3}) * f_1 = m_{st} * (h_{s2} - h_w) \Rightarrow$$

$$m_{st} = \frac{m_k * c_{pk} * (t_{k1} - t_{k3}) * f_1}{h_{s2} - h_{w2}} = \frac{Q_{13}}{h_{s2} - h_{w2}} = \frac{50290.96}{3302.06 - 1090}$$

$$= 22.7 \frac{kg}{s} \text{ ή } 81.8 \frac{tn}{h}$$

### 8.2.5 Θερμότητά από απορροφά ο υπερθερμαντήρας ατμού.

Τα καυσαέρια εισέρχονται στην HRSG σε θερμοκρασία  $t_{k1} = 596^\circ\text{C}$ . Σε πρώτη φάση συναντάνε τον υπερθερμαντήρα ατμού, όπου εκεί ο κορεσμένος ατμός με εναλλαγή θερμότητας γίνεται υπέρθερμος. Δηλαδή από θερμοκρασία ατμού  $t_s = 256^\circ\text{C}$ , που έχει ο ατμός μετρά το δοχείο υψηλής πίεσης, σε θερμοκρασία  $t_{s2} = 440^\circ\text{C}$ . Όπου είναι και η τελική θερμοκρασία του ατμού πριν οδηγηθεί προς το κύκλωμα.

Να σημειώσουμε ότι ο ατμός που εισέρχεται στον υπερθερμαντήρα είναι υγρός, με ξηρότητα  $X = 0,98$ . Οπότε η ενθαλπία  $h_x$  του υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$h_x = h_3 + X * (h_4 - h_3) = 1115 + 0.98(2798 - 1115) = 2764.3 \text{ kJ/kg}$$

Ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται έχει ενθαλπία  $h_{s2} = 3302.06 \text{ kJ/kg}$ . Για πίεση  $44 \text{ bar}$  και θερμοκρασία  $440^\circ\text{C}$ . Η ενέργεια από απορροφάτε από τον υπερθερμαντήρα  $Q_{AB}$  μέσω των καυσαερίων μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{AB} = m_{st} * (h_{s2} - h_x) = 22.7 * (3302.06 - 2764.34)$$

$$= 12225 \text{ kJ/kg} \text{ ή } 12,2 \text{ MW}$$

όπου:

$h_x$ : η πραγματική ενθαλπία του ατμού με ξηρότητα  $X=0,98$

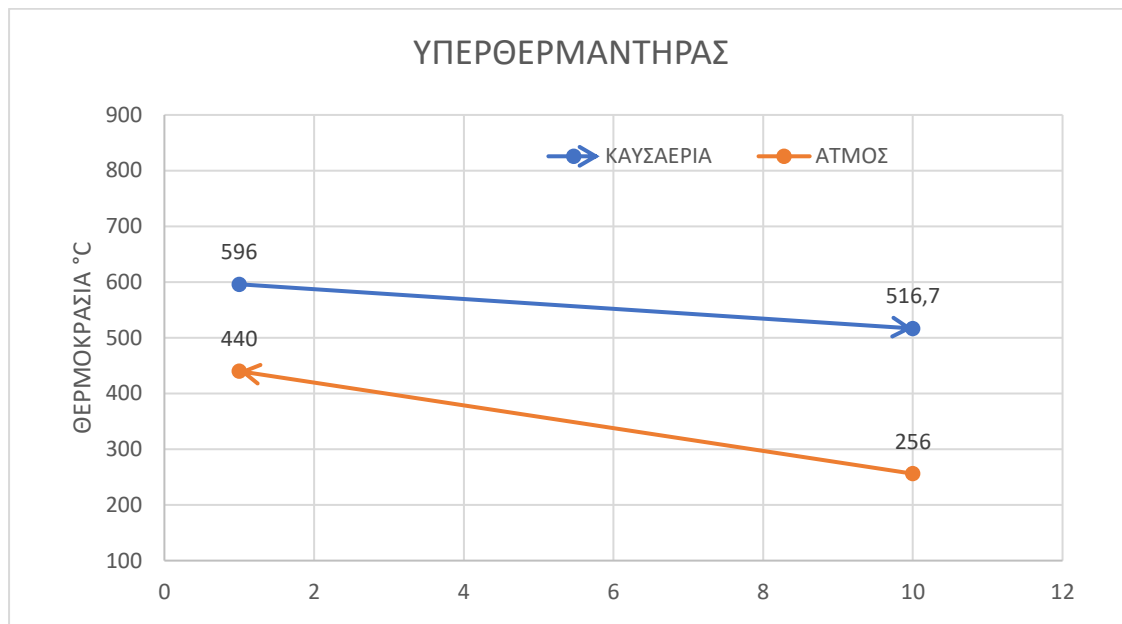
### 8.2.6 Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων στην έξοδο του υπερθερμαντήρα.



Η θερμοκρασία στην έξοδο υπερθερμαντήρα υπολογίζεται από την σχέση:  $\Delta T_{k1,2} = t_{k1} - t_{k2}$ . Το  $\Delta T$  μπορούμε να το υπολογίσουμε μέσω της σχέσης που περιγράφει το ενεργειακό ισοζύγιο στον υπερθερμαντήρα. Δηλαδή έχουμε:

$$Q_{AB} = Q_{sh} = m_k * c_{pk} * \Delta T_{k12} * f_1 \Rightarrow \Delta T_{k12} = \frac{Q_{AB}}{m_k * c_{pk} * f_1} = \frac{12225}{135.5 * 1.15 * (1 - 0.01)} = 79.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{k12} = t_{k1} - t_{k2} \Rightarrow t_{k2} = t_{k1} - \Delta T_{k12} = 596 - 79.2 \Rightarrow t_{k2} = 516.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

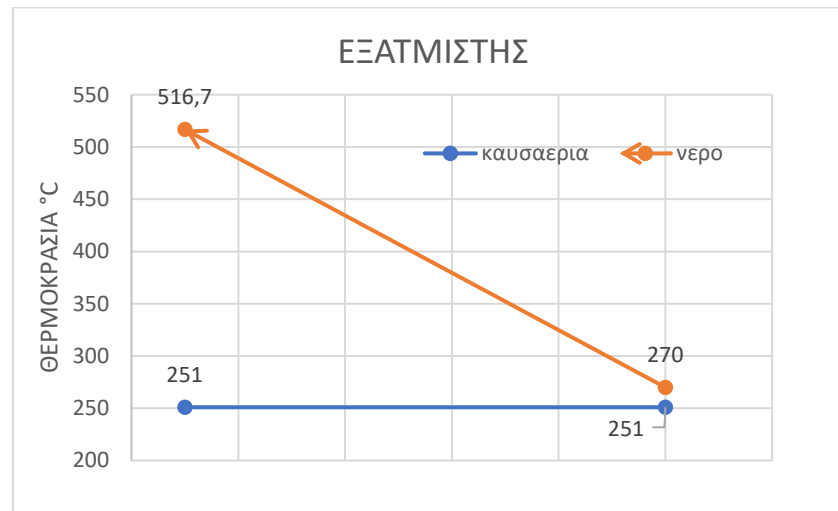


Διάγραμμα 8-1. Θερμοκρασιακή κατανομή υπερθερμαντήρα.

### 8.2.7 Ενέργεια που απορροφάται στον εξατμιστή.

Γνωρίζοντας την ενέργεια που απορροφάτε από το εξατμιστή και τον υπερθερμαντήρα, καθώς και την ενέργεια που απορροφά ο υπερθερμαντήρας, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορροφά ο εξατμιστής μέσω της σχέσης:

$$Q_{AC} = Q_{AB} + Q_{CB} \Rightarrow Q_{CB} = Q_{ex} = Q_{AC} - Q_{AB} = 50.29MW - 12.2MW = 38 MW$$



Διάγραμμα 8-2. Θερμοκρασιακή κατανομή εξατμιστή

### 8.2.8 Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίων μετά τον οικονομητήρα.

Με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο η ενέργεια που απορροφά ο οικονομητήρας είναι:

$Q_{CD} = Q_{οικ} = m_k * c_{pk} * (t_{k3} - t_{k4})$ . Η ενέργεια αυτή είναι ο λόγος που αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού από  $t_{w1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  σε  $t_{w3} = 251 \text{ }^\circ\text{C}$ . Γνωρίζοντας τις ενθαλπίες στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες που είναι:  $h_{w1} = 423.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  και

$h_{w2} = 1090 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  αντίστοιχα, μπορούμε μέσω της παρακάτω σχέσης να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορροφά ο οικονομητήρας.

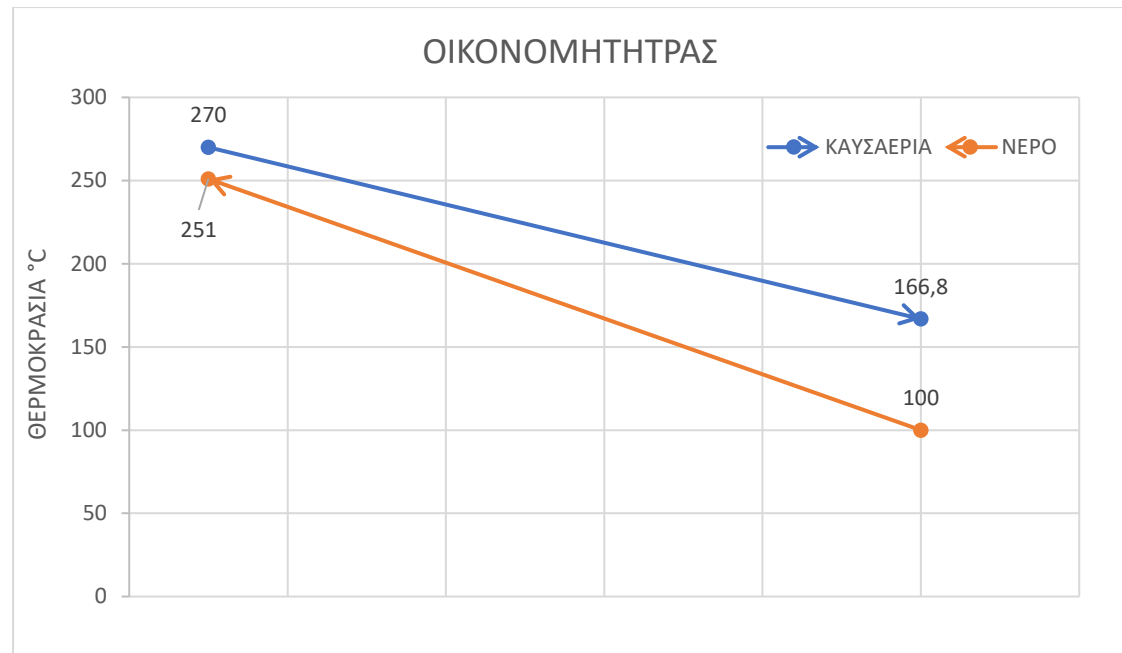
$$Q_{CD} = m_{b_{fw}} * (h_{w2} - h_{w1}) = m_{st} * 1.05 * (h_{w2} - h_{w1}) = 22.7 * 1.05 * (1090 - 423.5) = 15910.5 \text{ kW } \text{ ή } 16 \text{ MW}$$

Θεωρούμε ότι το νερό που βάζουμε στο δοχείο είναι ίσο με την παροχής του ατμοί με μια προσαύξηση περίπου 5%. Αυτό διότι υπολογίζουμε και τη στρατσώνα που βγάζει ένα μικρό μέρος του νερού.  $m_{b_{fw}} = m_{st} * 1,05$

Η διαφορά θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο και την έξοδο του οικονομητήρα  $\Delta T_{k34} = t_{k3} - t_{k4}$  υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} Q_{CD} &= m_k * c_{pk} * \Delta T_{k34} * f_1 \Rightarrow \Delta T_{k34} = \frac{Q_{CD}}{m_k * c_{pk} * f_1} \\ &= \frac{15910.45}{135.5 * 1.15 * (1 - 0.01)} \Rightarrow \Delta T_{k34} = 103.1 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\Delta T_{k34} = t_{k3} - t_{k4} \Rightarrow t_{k4} = t_{k3} - \Delta T_{k34} = 270 - 103.13 = 166.8^\circ\text{C}$$



Διάγραμμα 8-3. Θερμοκρασιακή κατανομή οικονομητήρα.

Στην εισαγωγή του κεφαλαίου αναφέραμε μια συνθήκη η οποία πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να έχουμε τη σωστή λειτουργία της μονάδας ανάκτησης θερμότητας. Με βάση τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών των καυσαερίων, όπως αυτά διαμορφώθηκαν παραπάνω, προκύπτει η παρακάτω συνθήκη, η οποία όπως βλέπουμε ικανοποιείται:

$t_{k3} > t_s$	$t_{k4} > t_{w1}$
$270\text{ °C} > 256\text{ °C}$	$166.8\text{ °C} > 103\text{ °C}$

Πίνακας 8-2. Συνθήκες για σωστή λειτουργία της HRSG

	Θερμοκρασία Καυσαερίων Είσοδος-Εξοδος °C		Θερμοκρασία Νερού/Ατμού Είσοδος/Εξοδος °C		Θερμικό φορτίο MW	Παραγωγή Ατμού/Νερού tn/h
	270	166.8	100	251		
Οικονομητήρας	270	166.8	100	251	15.9	85.9
Εξατμιστής	516.7	270	251	256	38	81.8
Υπερθερμαντήρας	596	516.7	256	440	12,2	81.8

Πίνακας 8-3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συστήματος HRSG

### 8.3 Ενεργειακό ισοζύγιο HRSG.

Η ενέργεια των καυσαερίων  $Q_k$  στην είσοδο της μονάδα ανάκτησης θερμότητας (HRSG) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} Q_k &= m_k * c_{pk} * (t_{k1} - T_1) = 135.5 * 1.15 * (596 - 27) \\ &= 88664.4 \text{ kW ή } 88.6 \text{ MW} \end{aligned}$$

Η ενέργεια που απορροφούν τα στοιχεία του ατμολέβητα είναι:

$$Q_t = Q_{oik} + Q_{ex} + Q_{sh} = 15.9 + 38 + 12.2 = 66.2 \text{ MW}$$

Η ενέργεια που χάνεται στο περιβάλλον από την απελευθέρωση των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα είναι:

$$Q_{los} = m_k * c_{pk} * (t_{k4} - T_1) = 135.5 * 1.15 * (153.4 - 27) = 21.7 \text{ MW}$$

Οι απώλειες θερμικού φορτίου λόγω ακτινοβολίας και αγωγιμότητας  $Q_{epif}$  υπολογίζονται ως εξής:

$$Q_{epif} = Q_k - (Q_t + Q_{los}) = 88.6 - (66.2 + 21.7) = 0.66 \text{ MW}$$

#### 8.4 Θερμική απόδοση του συστήματος ανάκτησης θερμότητας HRSG.

Η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{los} + Q_{epif}}{Q_k} = 1 - \frac{21.7 + 0.66}{88.6} = 0.746 \text{ ή } 74,6\%$$

Στις παραπάνω ενότητες είδαμε και περιγράψαμε τα στοιχεία ενός αεριοστρόβιλου και της μονάδας ανάκτησης. Παρακάτω θα δούμε και θα συγκρίνουμε τα παραπάνω στοιχεία, με τα στοιχεία που θα προκύψουν από την ανάλυση διπλού αεριοστρόβιλου ηλεκτρικής ισχύος 33 MW ο κάθε ένας. Τα αποτελέσματα θα δοθούν σε συγκεντρωτικό πίνακα. Οι διαδικασίες και οι τύποι είναι οι ίδιοι με τους παραπάνω.

Ο διπλός αεριοστρόβιλος που μελετήθηκε είναι της SIEMENS ο SGT 700 (SIEMENS, 2022)

<i>Turbine data</i>		
<i>sgt – 700 siemens</i>		
<i>Power output</i>	33	<i>MW</i>
<i>Gross efficiency</i>	37,2%	
<i>Heat rate</i>	9675	<i>KJ/kWh</i>
<i>Speed</i>	6500	<i>rpm</i>
<i>Pressure ratio</i>	18,7	
<i>Exhaust mass flow meg</i>	95	<i>kg/s</i>
<i>exhaust gas temperature</i>	533	<i>°C</i>

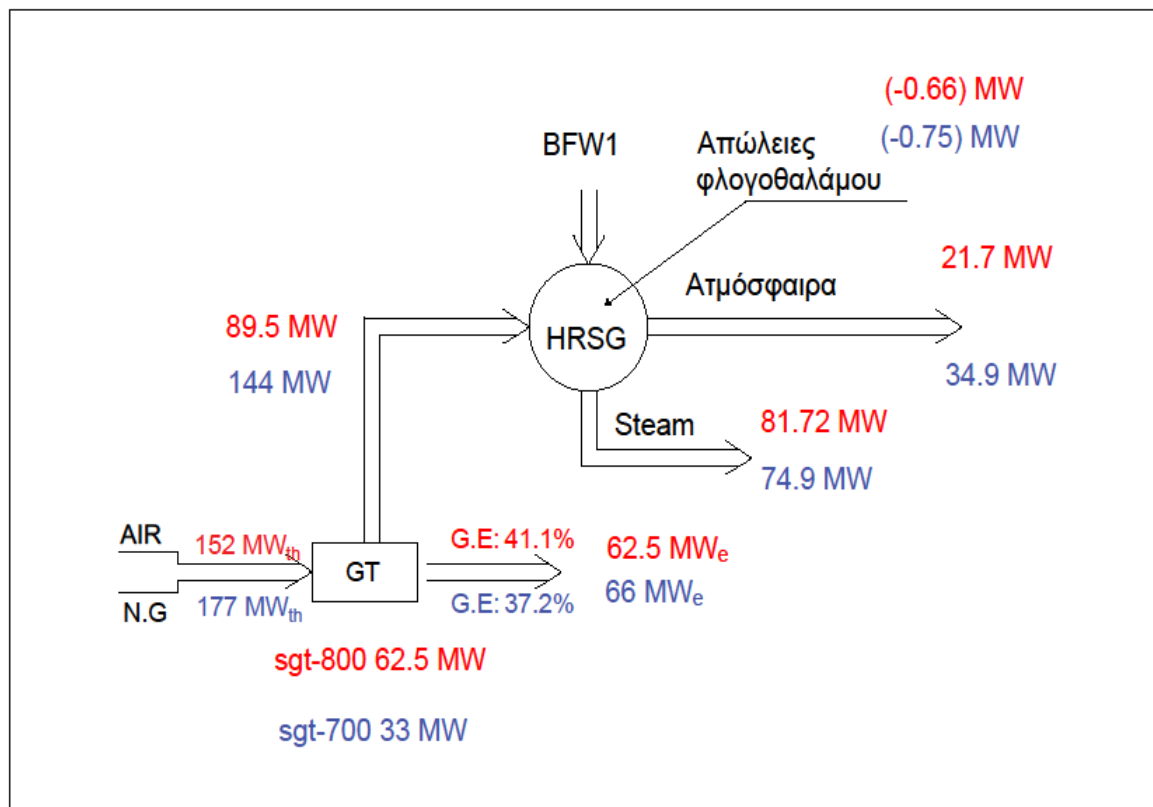
Πίνακας 8-4. Αεριοστρόβιλος SIEMENS SGT-700. (SIEMENS, 2022)

Σημείο 1	P1	1,013	bar
	T1	27	°C
Σημείο 2	P2	18,7	bar
	T2	492	°C
Σημείο 3	P3	18,7	bar
	T3	1220	°C
Σημείο 4	P4	1,88	bar
	T4	533	°C

Πίνακας 8-5. Σημεία κύκλου BRAYTON

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΚΑΣ							
ΜΟΝΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ SGT 800				ΔΙΠΛΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ(33 MW) SGT 700			
ΗΛ. ΦΟΡΤΙΟ	62	MW			66	MW	2 x 33 MW
Exhaust mass flow	135,5	kg/s			190	kg/s	2x95 kg/s
Exhaust gas temperature	596	C			533	C	
Μάζα καυσίμου	2,65	kg/s	9,54	tn/h	3,2	kg/s	11,5 tn/h
Μάζα αέρα	133	kg/s	478,2	tn/h	187	kg/s	672 tn/h
Ατμός	22,7	kg/s	81,72	tn/h	25,7	kg/s	92,6 tn/h
Απόδοση HRSG	75	%			67,7	%	
Θερμική απόδοση κύκλου	58	%			57	%	
ειδική κατανάλωση καυσίμου	0,16	tn/MWh			0.35	tn/MWh	
ειδική εκπομπή CO <sub>2</sub>	0.44	tn/MWh			0.96	tn/MWh	

Πίνακας 8-6. Συγκενρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων των δύο περιπτώσεων της μελέτης.



Σχήμα 8-5. Ενεργειακό ισοζύγιο μονάδας

## 9 ΚΕΦΑΛΑΙΟ-9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

### 9.1 Συμπέρασμα 1

Στην αρχή της μελέτης είπαμε ότι θα μελετήσουμε δυο διαφορετικές περιπτώσεις εγκατάστασης αεριοστροβίλων, οι οποίοι θα τοποθετηθούν ούτως ώστε να γίνει η κάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται από την εγκατάσταση. Μια περίπτωση ενός αεριοστροβίλου και η άλλη ενός διπλού. Κατά την ολοκλήρωση της παραπάνω μελέτης έχουμε στον παραπάνω πίνακα τα συγκριτικά αποτελέσματα.

Βλέπουμε ότι κατά την χρήση μονού αεριοστροβίλου έχουμε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Πράγμα που το καθιστά πιο οικονομικό. Με αυτό τον τρόπο όμως μειώνεται περίπου 10% η παραγωγή ατμού που είναι αναγκαία για τις διεργασίες της βιομηχανίας. Παρατηρούμε επίσης ότι μειώνεται περίπου 8% η απόδοση της HRSG, στην περίπτωση του δευτέρου αεριοστροβίλου. Αυτό συμβαίνει διότι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τους αεριοστροβίλους είναι χαμηλότερη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση κατά 63 °C.

Τελειώνοντας στη μια περίπτωση του μονού αεριοστροβίλου κερδίζεις απόδοση στην μονάδα ανάκτησης και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Επιπρόσθετα με τη χρήση ενός αεριοστροβίλου μειώνεται και το κόστος συντήρησης. Στην άλλη περίπτωση το θετικό στοιχείο είναι ότι σε περίπτωση που χρειαστεί να σταματήσουν οι αεριοστροβίλοι για τακτική συντήρηση μπορείς να το κάνεις σταματώντας τον ένα κάθε φορά. Αυτό σου δίνει το πλεονέκτημα να μην διακόψεις ολοκληρωτικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού έως ότου τελειώσει η επισκευή.

Σε κάποιες βιομηχανίες υπάρχουν κάποια ηλεκτρικά φορτία που θεωρούνται κρίσιμα. Τα οποία δεν πρέπει να απορριφθούν από το σύστημα για την ασφαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων. Με τη χρήση δύο αεριοστροβίλων μπορείς να έχεις αυτά τα κρίσιμα φορτία πάντα στον αεριοστροβίλο που δουλεύει. Έτσι εξασφαλίζεις ότι οποιαδήποτε ανωμαλία στο δίκτυο δεν θα σου επηρεάσει σημαντικά την σωστή λειτουργία των μονάδων παραγωγής του εκάστοτε προϊόντος. Όπου αντίθετα στην πρώτη περίπτωση αυτό δεν μπορείς να το επιτυχείς και εξαρτάσαι 100% από το δίκτυο.



## 9.2 Συμπέρασμα 2

Επιπρόσθετα μπορούμε να προσθέσουμε ότι βάση υπολογισμών είδαμε ότι η παραγωγή CO<sub>2</sub> του αεριοστρόβιλου είναι 0,42 tn/MWh (σελ.69) επιβεβαιώνει την βιβλιογραφία (βλ. Εικόνα 3-6). Σύμφωνα με το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3, είδαμε ότι η ΕΕ προσπαθεί να μειώσει τους ρύπους ανά παραγομένη kWh. Για τους αεριοστρόβιλους σύμφωνα με βιβλιογραφία ο στόχος είναι 0,1gr/kwh. Με αυτό το περιορισμό κρίνεται αναγκαίο στη μονάδα που μελετήθηκε να χρησιμοποιηθεί και μια άλλη μονάδα η οποία θα κάνει δέσμευση του CO<sub>2</sub>. Με αυτό τον τρόπο θα συμβάλλουμε στην προσπάθεια που γίνεται για μείωση εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου. Καθώς και στην επιδότηση που θα μας χορηγηθεί από την ΕΕ.

Επιπρόσθετα με αυτό το τρόπο μειώνεις και το φόρο που καταβάλλεις για εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anon., χ.χ. *SIEMENS-ENERGY*. [Ηλεκτρονικό].

Antonenko, O., 2020. *Control Risks*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.controlrisks.com/our-thinking/insights/eu-green-transition-likely-to-reshape-relationships-with-key-energy-suppliers>

[Πρόσβαση 25 3 2022].

Dr. Max Roser, D. H. R., χ.χ. *Our World in Data*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

[Πρόσβαση 11 7 2022].

el.wikipedia, 2022. *el.wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE#%CE%9D%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%84%CE%B7%CF%82%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82>

[Πρόσβαση 19 2 2022].

Engineering, B. H., 2011. *Bright Hub Engineering*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.brighthubengineering.com/power-plants/114797-pros-and-cons-of-natural-gas-use/>

[Πρόσβαση 22 3 2022].

EUROSTAT, χ.χ. *EUROSTAT*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Extra\\_EU-](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Extra_EU-27_imports_of_natural_gas_from_main_trading_partners,_2019_and_first_semester_2020.png#filelinks)

[27\\_imports\\_of\\_natural\\_gas\\_from\\_main\\_trading\\_partners,\\_2019\\_and\\_first\\_semester\\_2020.png#filelinks](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Extra_EU-27_imports_of_natural_gas_from_main_trading_partners,_2019_and_first_semester_2020.png#filelinks)

[Πρόσβαση 25 3 2022].

IEA, 2008. *IEA*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/d459f7d5-1ba7-49d9-ad56-915fba22f267/chp\\_report.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/d459f7d5-1ba7-49d9-ad56-915fba22f267/chp_report.pdf)

[Πρόσβαση 24 3 2022].

IEA, χ.χ. *IEA*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions>

[Πρόσβαση 11 7 2022].

INOPLEX, χ.χ. *INOPLEX*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.inoplex.com.au/information/cogeneration-systems-advantages-and-disadvantages>

[Πρόσβαση 28 4 2022].

Jim Noordermeer, P. C., 2016. *na.eventscloud.com*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

[https://na.eventscloud.com/file\\_uploads/7cab61b6ad654487f39eb91267b3becd\\_GasTurbineBasics.pdf](https://na.eventscloud.com/file_uploads/7cab61b6ad654487f39eb91267b3becd_GasTurbineBasics.pdf)

[Πρόσβαση 18 2 2022].

- John Catillaz, D. J. G., 2021. *General Electric*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en\\_US/downloads/gas-new-site/future-of-energy/decarbonizing-gas-turbines-ccus-gea34966.pdf](https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/future-of-energy/decarbonizing-gas-turbines-ccus-gea34966.pdf)  
[Πρόσβαση 11 7 2022].
- Kim, J. S., 2014. *researchgate*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://www..net/figure/Schematic-of-the-HRSG\\_fig5\\_264384477](https://www..net/figure/Schematic-of-the-HRSG_fig5_264384477)  
[Πρόσβαση 19 2 2022].
- Meseret Nasir Reshid, W. M. W. M. a. M. A. A. M., 2016. *Science Alert*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2017.22.31>  
[Πρόσβαση 17 6 2022].
- Nicolae Scarlat, M. P. P., χ.χ. *Science direct*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921012149#b0005>  
[Πρόσβαση 11 7 2022].
- nirrootavan, χ.χ. *nirrootavan*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <http://www.nirrootavan.com/portfolio-item/jahrom-hrsg/>  
[Πρόσβαση 19 2 2022].
- PM, B. H., 2009. *Bright Hub Engineering*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.brighthubengineering.com/power-plants/42019-what-are-the-types-of-hrsgs/>  
[Πρόσβαση 21 3 2022].
- Rackley, S. A., 2017. *Science Direct*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/heat-recovery-steam-generation>  
[Πρόσβαση 15 6 2022].
- Roumeliotis, I., 2012. *researchgate*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://www..net/figure/Schematic-figures-of-vertical-left-and-horizontal-right-HRSGs-2\\_fig3\\_321866663](https://www..net/figure/Schematic-figures-of-vertical-left-and-horizontal-right-HRSGs-2_fig3_321866663)  
[Πρόσβαση 19 2 2022].
- Shiozaki, S., 2021. *sciencedirect*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/supplemental-firing>  
[Πρόσβαση 19 2 2022].
- SIEMENS, 2022. *SIEMENS-ENERGY*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-700.html>
- SIEMENS-ENERGY, 2022. *SIEMENS-ENERGY*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-800.html>
- software, p., χ.χ. *peace software*. [Ηλεκτρονικό]  
Available at: [https://www.peacesoftware.de/einigewerte/co2\\_e.html](https://www.peacesoftware.de/einigewerte/co2_e.html)

SUBBARAO, P., χ.χ. *slideplayer*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://slideplayer.com/slide/17052115/>

[Πρόσβαση 19 2 2022].

turbosquid, χ.χ. *turbosquid*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.turbosquid.com/3d-models/sgt6-5000f-gas-turbine-3d-model-1548893>

[Πρόσβαση 19 2 2022].

Valadis, K., 2015. *blogger*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://valadis-kotorlos.blogspot.com/2015/08/normal-0-false-false-false-el-x-none-x.html>

[Πρόσβαση 8 2 2022].

Woodford, C., 2021. *Explain that stuff*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://www.explainthatstuff.com/combinedheatpower\\_cogeneration.html](https://www.explainthatstuff.com/combinedheatpower_cogeneration.html)

[Πρόσβαση 24 3 2022].

Yousri M. A. Welaya, M. M. N. R. A., 2013. *RESEARCH GATE*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [https://www.researchgate.net/figure/T-Q-diagram-for-exhaust-gas-boiler-EGB\\_fig2\\_263090547](https://www.researchgate.net/figure/T-Q-diagram-for-exhaust-gas-boiler-EGB_fig2_263090547)

[Πρόσβαση 17 6 2022].

ΔΕΣΦΑ, 2022. *desfa.gr*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.desfa.gr/regulated-services/transmission/pliroforisimetaforas-page/historical-data/heat-producing-energy>

[Πρόσβαση 21 2 2022].

Μανωλάκος, Δ. Δ., χ.χ. *oeclass.aua*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

[https://oeclass.aua.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L5\\_Brayton\\_Cycle%20%2831%20slides%29.pdf](https://oeclass.aua.gr/eclass/modules/document/file.php/612/L5_Brayton_Cycle%20%2831%20slides%29.pdf)

[Πρόσβαση 19 2 2022].

Πελλής, Σ., 2012. *physiclessons.blogspot*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: [http://physiclessons.blogspot.com/2012/11/blog-post\\_3829.html](http://physiclessons.blogspot.com/2012/11/blog-post_3829.html)

[Πρόσβαση 19 2 2022].

Πολυζάκης, Α., 2017. Αεριοστροβιλικό Σταθμοί. Στο: *Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ισχύος*. s.l.:Power Heat Cool.

ΦΩΤΙΟΣ, Κ., 2021. *ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΥΣΙΜΑ*. s.l.:s.n.

Ωστενιτης, 2019. *el.wikipedia*. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://.org/wiki/%CE%A9%CF%83%CF%84%CE%B5%CE%BD%CE%AF%CF%84%CE%B7%CF%82>

[Πρόσβαση 18 2 2022]

## 10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.

## Υπολογισμοί αεριοστρόβιλου 62 MW

Turbine data			MWth	152	MW		
sgt-800 siemens			Mwboiler	89,56813	MW		
			Θεωρητικός λογος συμπίεσης				
Power output	62,5	MW	rc	20,8			
Gross efficiency	0,411		P2	21,1	bar		
Heat rate	8759	KJ/kWh	P3	21,1	bar		
Speed	6600	rpm	θερμοκρασια στο σημειο 2 (ισεντροπικη μεταβολη)				
Pressure ratio	21,1		T2`	714	K	441	C
Exhaust mass flow	135,5	kg/s	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης				
exhaust gas temperature	596	°C	ηc	0,84		84,4	%
operation hours	8448	h/y	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης(από διάγραμμα)				
Eel	528000	MWh/y	ηpol	0,9		90	%
EEK	0,157833	tn/MWh	(n-1)/n	0,32	0,31		
mCO2	230457,5	tn/y	T2 πραγματική				
EEO2	0,436473	tn/MWh	T2π	513	C	786	K
Ρδίκτουο	25	bar	Μαζα καυσιμου (με εξισωση ενθαλπιας)				
Τδίκτουο	15	°C	Mng	2,74	kg/s	9,9	tn/h
Ρατμ.	1,013	bar	*2	5,5		19,7	
NG	Cp	2,52	Υπολογισμός περίσσειας αέρα				
	Cv	1,93	μαερα	133	kg/s	477,9	tn/h
Πυκνότητα	ρ	0,73	λογος καυσιμα	48,4496			
	γ	1,31	Στοιχειομετρία καύσης μεθανίου				
	Z	0,98	CH4	202	CO2	H2O	
Ενθαλπία καύσης	ΔH	9600		16	64		
		4,184	Kgair/KGng	17,5			
		55496					
Air	T	300					
	P	1	στοιχειομετρικ	48,0	kg/s	172,6	tn/h
	Cp	1,005		95,9		345,3	
	Cv	0,718	Περίσσεια	1,77		176,9	%
	γ	1,40	πιεση εξοδου καυσαερων				
	(γ-1)/γ	0,29	(n-1)/n=0,36 , n/(n-1)=2,8			2,8	
	Z	0,99	P4	1,16		P4π	1,98
ΣΗΜΕΙΟ 2	T	573					
	P	21,1	σημειο 1	P1		1,0	bar
	Cp	1,005		T1		300,0	K
	Cv	0,718	σημειο 2	P2		20,7	bar
	γ	1,40		T2		513,2	K
	(γ-1)/γ	0,29	σημειο 3	P3		20,3	bar
	Z	1,007		T3		1670	K
Καυσαερια	cp	1,075	0,426559326	σημειο 4	P4	1,2	bar
	596 cv	0,88	1,738676074		T4	869,0	K
		1,22	0,947228034				
	(γ-1)/γ	0,18					
	T	596	869	KATAN.KA	2,74	kg/s	
Αποδοση καυσης	ηb	0,98		Katan.aera	132,8	kg/s	
				cpk	1,075		
Αποδοση συμπίεστη	ηc	0,98					
Θερμοκρασια φλογοθαλαμου				ηth	0,58		57,98
LHV	55496	KJ/Kg					
T2π	786,2114	K					
	27						
T1	300	K					
ηb	0,98						
cpf	2,34						
Cpa	1,005						
Cpk	1,155						
t2	373						
t1	288						
f	48,4496						
T3	1670	K					1397

Υπολογισμός παραγομένου ατμού για 62 MW

ΔΕΔΟΜΕΝΑ			tk3	270 C														
tk1	596 C		tw2	251 C	hw2	1090	kJ/kg											ΘΕΡΜΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ
tstack	150 C		tw1	100 C	hw1	423,5	kJ/kg											
ts(saturated steam)	256 C														Q	88664,4	kw	88,66443
P(τυματινίου)	44 bar		Q13	50290,96	kw	50,2909605												
hw3(κορεσμένο νερό)	1115,4	kJ/kg													Qt	66,2		
P(superheat steam)	44 bar		hx	2764,3	kJ/kg													
T	440 C														Qper	21794,3		21,79431
hs	3302,06	kJ/kg	Qab	12225,01	kw	12,23												
pinch point(pp)	14 C									mbfw	23,9	85,9	ΔQ	0,67				
aproach point	5 C		mst	22,7	kg/s	81,85		tn/h		απώλεια	1,1							
συντελεστής απωλειών	1	0,99									85,9		η	0,75		74,7		
mk(μάζα καυσαερίων)	135,5	kg/s	ΔTk12	79,2	C													
cp	1,15																	
h3(ενθ. κορ. νερού 256)	1115	kJ/kg	tk2	516,8	C													
h4(ενθ. κορ. ατμού 256)	2798	kJ/kg																
χ(ξηροτητα ατμού)	0,98		Qcb	38065,95	kw	38,06595065												
hstsup	3302,06	kJ/kg																
Tperivallon	27		Qoik	15910,5	kw	15,91045064												
			ΔTk3,4	103,1	C													
			tk4	166,9	C													

## Υπολογισμοί για αεριοστρόβιλο 33 MW.

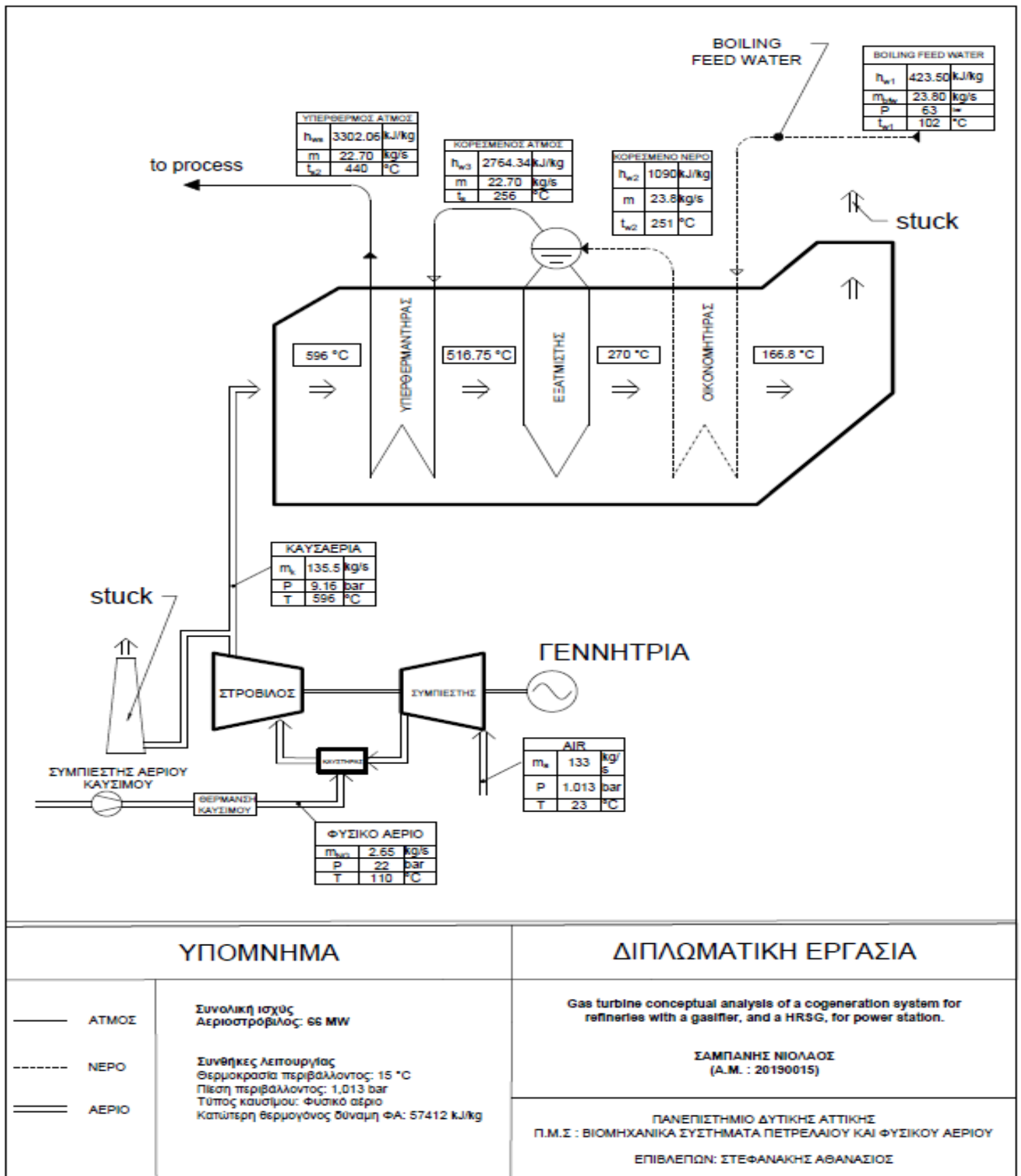
Turbine data			MWth	89	MW	177	
sgt-700 siemens			Mwboiler	56	MW	177	
			Θεωρητικός λογος συμπίεσης				
Power output	33	MW	rc	18,5			
Gross efficiency	0,372		P2	18,7	bar		
Heat rate	9675	KJ/kWh	P3	18,7	bar		
Speed	6500	rpm					
Pressure ratio	18,7		θερμοκρασια στο σημειο 2 (ισεντροπικη μεταβολη)				
Exhaust mass flow	95	kg/s	T2`	697	K	424	C
exhaust gas temperature	533	°C					
operation hours	8448	h/y	Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης				
			ηc	0,85		85,2	%
Eel	278784	MWh/y	557568	Πολυτροπικός βαθμός απόδοσης(από διάγραμμα)			
EEK	0,17438	tn/MWh	0,348760969	ηpol	0,9	90	%
mCO2	134438,5	tn/y	268877,0154	(n-1)/n	0,32		
EEO2	0,482232	tn/MWh	0,964463582	T2 πραγματική			
				T2π	765	K	492
				Μαζα καυσιμου (με εξισωση ενθαλπιας)			
Ρδίκτου	25	bar	Mng	1,6	kg/s	5,8	tn/h
Τδίκτου	15	°C	*2	3,2		11,5	
Ρατμ.	1,013	bar	Υπολογισμός περισσειας αέρα				
NG	Cp	2,52	kJ/kgK	μαερα	93,4	kg/s	336,2
	Cv	1,93	kJ/kgK				tn/h
Πυκνότητα	ρ	0,73	kg/m3		187		672
	γ	1,31		λογος καυσι	58,4	186,8	672,5
	Z	0,98		Στοιχειομετρία καύσης μεθανίου			
Ενθαλπία καύσης	ΔH	9600,00	kcal/Nm3	CH4	202	CO2	H2O
		4,18	kJ/kcal	16	64		
		55496,00	kJ/kg	Kgair/KGng	17,5		
Air	T	300,00	K	στοιχ. αερασ	28,0	kg/s	100,7
	P	1,00	BAR		55,9		201,4
	Cp	1,01	kJ/kgK	Περίσσεια	0,7		70,05023222
	Cv	0,72	kJ/kgK	πιεση εξοδου καυσαεριων		(n-1)/n=0,36 , n/(n-1)=2,8	2,8
	γ	1,41		P4	1,07	P4π	1,88
	(γ-1)/γ	0,29		Θερμοκρασια φλογοθαλαμου			
	Z	0,99		LHV	55496	KJ/Kg	
ΣΗΜΕΙΟ 2	T	573,00	K	T2π	765,37752	K	
	P	21,10	BAR		27		
	Cp	1,05		T1	300	K	
	Cv	0,72		hb	0,98		
	γ	1,47		crf	2,34		
	(γ-1)/γ	0,32		Cpa	1,005		
	Z	1,01		Cpk	1,155		
Καυσαερια	cp	1,20	kJ/kgK	t2	373		
	cv	1,01	kJ/kgK	t1	308		
	γ	1,41		f	58,4		
	(γ-1)/γ	0,29					
	T	596,00	869	T3	1493	K	1220
Αποδοση καυσης	ηb	0,98		Αποδοση συ ης	0,98		

## Υπολογισμός ατμού για διπλό αεριοστρόβιλο 2\*33MW.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ				tk3	270	C													
tk1	533	C		tw2	251	C	hw2	1090	kJ/kg					ΘΕΡΜΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ					
tstack	150	C		tw1	100	C	hw1	423,5	kJ/kg										
ts(saturated steam)	256	C												Q	110561	kw		110,6	mw
P(τυμπανου)	44	bar		Q13	56890,8	kw		56,9	mw										
hw3(κορεσμενο νερο)	1115,4	kJ/kg												Qt	74,89				
P(superheat steam)	44	bar		hx	2764,3	kJ/kg													
T	440	C												Qper	34915,25			34,9	mw
hs	3302,06	kJ/kg		Qab	13829,3	kw		13,83	mw										
pinch point(pp)	14	C								mbfw	27,00442	97,2159	ΔQ	0,756457					
aproach point	5	C		mst	25,7	kg/s		92,6	tn/h	απωλειες	1,05								
συντελεστής απωλειων	1	0,99									97,2159		η	0,677				67,7%	
mk(μαζα καυσαεριων)	190	kg/s		ΔTk12	63,9	C													
cp	1,15																		
h3(ενθ. κορ.νερου 256)	1115	kJ/kg		tk2	469,1	C													
h4(ενθ. κορ.ατμου 256)	2798	kJ/kg																	
χ(ξηροτητα ατμου)	0,98			Qcb	43061,5	kw		43,06	mw										
hstsup	3302,06	kJ/kg																	
Tperivallon	27			Qoik	17998,4	kw		18,00	mw										
				ΔTk3,4	83,2	C													
				tk4	186,8	C													

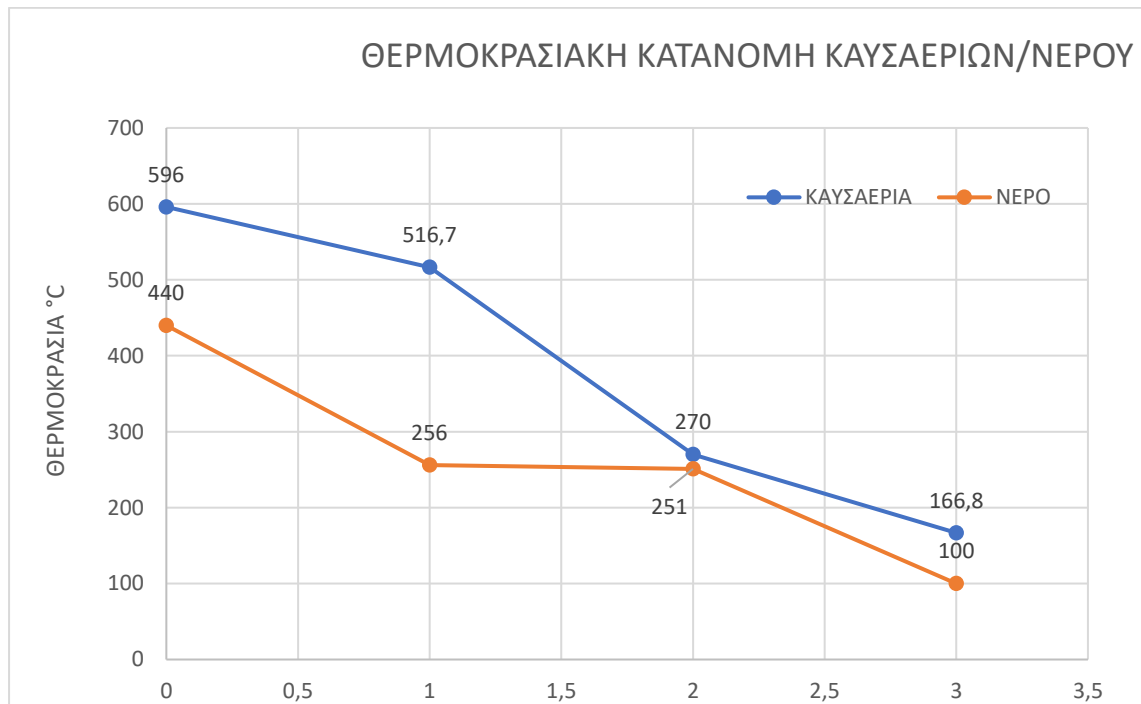


Σχεδιάγραμμα διάταξης μονάδας.



Σχήμα 110-1. Διάγραμμα μονάδας

Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων/νερού



Διάγραμμα 10-1. Θερμοκρασιακή κατανομή καυσαερίων/νερού.