



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ
ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ»**

Του Φοιτητή

Σιτέ Στέφανου

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Σωτήριο Καρέλλα, για τις συμβουλές, τις οδηγίες καθώς και για τη βοήθεια που μου παρείχε για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Άγγελο Δουκέλη, για την αψόγη συνεργασία μας και τη βοήθεια την οποία μου παρείχε.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Θεοφάνη και Παναγιώτα, στην αδερφή μου Τριανταφυλλιά και στον αδερφό μου Γιώργο για τη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	7
Περίληψη.....	11
Abstract	13
Κεφάλαιο 1. Διυλιστήρια και Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Κύρια Μέρη Παραγωγής Θερμότητας	16
1.2.1 Φούρνοι (Combustion Furnaces)	16
1.2.2 Λέβητες (Steam Boilers)	17
1.2.3 Εναλλάκτες Θερμότητας (Heat Exchangers)	18
1.3 Μηχανές Παραγωγής Ενέργειας	19
1.3.1 Ατμοστρόβιλοι (Steam Turbines)	19
1.3.2 Αεριοστρόβιλοι (Gas Turbines)	21
1.4 Τεχνολογίες Συμπαραγωγής	22
1.4.1 Συστήματα Συμπαραγωγής με Ατμοστρόβιλο	22
1.4.2 Συστήματα Συμπαραγωγής με Αεριοστρόβιλο	24
1.4.3 Συστήματα Συμπαραγωγής με Συνδιασμένο Κύκλο Αεριοστροβίλου-Ατμοστροβίλου.....	25
1.4.4 Συστήματα Συμπαραγωγής με Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης	25
1.4.5 Άλλες Τεχνολογίες Συμπαραγωγής	25
Κεφάλαιο 2. Θερμοδυναμική Ανάλυση και Εξεργειακή Ανάλυση.....	26
2.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση	26
2.1.1 Θερμοδυναμικά Αξιώματα.....	26
2.1.2 Κύκλος Carnot.....	27
2.1.3 Κύκλος Clausius – Rankine.....	27
2.1.4 Διάγραμμα Sankey	30
2.2. Εξεργειακή Ανάλυση	31
2.2.1 Ορισμός Εξέργειας	31
2.2.2 Εξέργεια Έργου	31
2.2.3 Θερμική Εξέργεια	31
2.2.4 Εξέργεια Συστήματος	32
2.2.5 Εξέργεια Ροής.....	33
2.2.6 Χημική Εξέργεια	34
2.2.7 Εξέργεια Θερμικής Ακτινοβολίας.....	38

2.2.8 Ισολογισμός Εξέργειας	38
2.2.9 Διάγραμμα Grassmann.....	40
Κεφάλαιο 3. Μελέτη Σεναρίων	41
3.1 Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης	45
3.2 Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης	47
3.3 Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας	49
3.4 Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση	51
Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας των μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.....	53
Κεφάλαιο 5. Οικονομική Ανάλυση.....	60
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα	65
6.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση	65
6.1.1 Ηλεκτρική Ενέργεια	65
6.1.2 Θερμική Ενέργεια.....	66
6.1.3 Ολική Ενέργεια	68
6.1.4 Διαφορά θερμοκρασίας στους Θερμικούς Καταναλωτές	70
6.1.4 Παροχή Καυσίμου	71
6.1.2 Διαγράμματα Sankey, Grassmann	72
6.1.3 Διαγράμματα T-s	77
6.1.4 Διαγράμματα T-Q.....	81
6.1.5 Παρατηρήσεις	86
6.2 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας των μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.....	87
6.2.1 Με επιστροφή συμπυκνώματος	87
6.2.2 Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος.....	89
6.2.3 Παρατηρήσεις	92
6.3 Οικονομική Ανάλυση.....	94
6.3.1 Οικονομικοί Δείκτες	95
6.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας	98
6.3.2 Παρατηρήσεις	13030
Κεφάλαιο 7. Σύνοψη	1311
Παράρτημα.....	133
Παράρτημα Α – Ανάλυση	133
Α.1 Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης.....	135
Α.2 Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης	148

A.3 Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας	163
A.4 Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση	177
Παράρτημα Β – Νομοθεσία	192
Βιβλιογραφία	195

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση των ενεργειακών και οικονομικών μεγεθών εναλλακτικών συστημάτων συμπαραγωγής, τα οποία έχουν ως σκοπό την κάλυψη θερμικών αναγκών σε διυλιστήρια.

Στο πλαίσιο της εργασίας σχεδιάζονται συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης, με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης - απομάστευσης, με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς επιπλέον καύση καθώς και με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας με επιπλέον καύση.

Αρχικά πραγματοποιείται ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση των παραπάνω συστημάτων. Στη συνέχεια τα σενάρια ελέγχονται αν αποτελούν συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ). Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας γίνεται μία οικονομική ανάλυση καθώς και μία ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων της κάθε επένδυσης.

Από την ανάλυση των εξεταζόμενων συστημάτων συμπαραγωγής προκύπτουν τα συμπεράσματα σχετικά με το ποιες είναι οι πιο συμφέρουσες λύσεις για την κάλυψη των θερμικών αναγκών ενός διυλιστηρίου.

Λέξεις – Κλειδιά: Αεριοστρόβιλος, Ατμοστρόβιλος, Εξέργεια, Θερμικός Καταναλωτής, Οικονομική Ανάλυση, ΣΗΘΥΑ, Συμπαραγωγή.

Abstract

This thesis aims in the thermodynamic and economic evaluation of alternative cogeneration systems, designed to cover the thermal requirements in refineries.

In the framework of the Thesis, different scenarios for the cogeneration of electricity and heat are evaluated. The examined cogeneration systems are the following: back-pressure steam turbine, condensing - extraction with steam turbine, gas turbine with heat recovery steam generator with no supplementary firing, and gas turbine with heat recovery steam generator and supplementary firing.

Firstly, the energy and exergy analysis of the examined systems is performed. Subsequently it is assessed whether the scenarios can be termed as High-Efficiency Combined Heat and Power systems (HECHP).

In the last part of the Thesis, a financial analysis of the various scenarios is made, as well as a sensitivity analysis, which targets to determine the critical parameters of each investment.

From the analysis of the cogeneration systems we come up with conclusions on which are the most effective solutions for covering the thermal requirements of a refinery.

Keywords: Gas Turbine, Steam Turbine, Exergy, Heat Sink, Economic Evaluation, HECHP, Cogeneration.

Κεφάλαιο 1. Διυλιστήρια και Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

1.1 Εισαγωγή

Το διυλιστήριο πετρελαίου αποτελεί μία βιομηχανική εγκατάσταση βαρέως τύπου. Σκοπός του είναι η επεξεργασία και διύλιση του αργού πετρελαίου στα πιο χρήσιμα παράγωγά του όπως το υγραέριο, η βενζίνη, το καύσιμο Diesel, το πετρέλαιο θέρμανσης και η άσφαλτος.



Σχήμα 1.1: Εικόνα Διυλιστηρίου [1]

Τα διυλιστήρια χαρακτηρίζονται ως χημικές εγκαταστάσεις. Πρόκειται ουσιαστικά για μεγάλα βιομηχανικά συγκροτήματα με διάφορες μονάδες χημικής επεξεργασίας οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους από ένα δίκτυο σωληνώσεων. Μεγάλο μέρος της εγκατάστασης δεσμεύουν οι δεξαμενές αποθήκευσης του αργού πετρελαίου, καθώς και των παραγώγων του.

Το ακατέργαστο αργό πετρέλαιο δεν είναι γενικά χρήσιμο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Με τη μέθοδο της διύλισης, οι διαφορετικές ενώσεις υδρογονανθράκων διαχωρίζονται σε συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα, λιπαντικά και ως πρώτες ύλες για πετροχημικές διεργασίες. Ένα σύγχρονο διυλιστήριο μετατρέπει τους βαρείς υδρογονάνθρακες σε υψηλότερης αξίας καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα, τα διαφορετικά σημεία βρασμού επιτρέπουν στους υδρογονάνθρακες να διαχωρίζονται με απόσταξη. Στη συνέχεια, αφού το καύσιμο ή το λιπαντικό καθαριστεί από προσμίξεις και ακαθαρσίες, μπορεί να πουληθεί χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.

Τα πετρελαϊκά προϊόντα ομαδοποιούνται συνήθως σε τρεις κατηγορίες: ελαφρά αποστάγματα (υγραέριο, βενζίνη, νάφθα), μεσαία αποστάγματα (κηροζίνη, ντίζελ), βαριά αποστάγματα και υπόλειμμα (βαρύ καύσιμο έλαιο, λιπαντικά λάδια, κεριά, άσφαλτος). Αυτή η κατηγοριοποίηση βασίζεται στον τρόπο απόσταξης του αργού πετρελαίου καθώς και στον τρόπο διαχωρισμού του σε κλάσματα.

Τα διυλιστήρια πετρελαίου παράγουν επίσης ποικίλα ενδιάμεσα προϊόντα όπως υδρογόνο, ελαφρούς υδρογονάνθρακες, αναμορφωμένη και πυρολυμένη βενζίνη. Αυτά δεν μεταφέρονται συνήθως, αλλά αναμειγνύονται και επεξεργάζονται με τα υπόλοιπα προϊόντα.

Για την επίτευξη όλων των απαραίτητων διεργασιών της διύλισης υπάρχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Για την ομαλή λειτουργία του διυλιστηρίου πρέπει να καλυφθούν οι ανάγκες σε κινητική, θερμική καθώς και ηλεκτρική ενέργεια. Στις περισσότερες εγκαταστάσεις, αυτό επιτυγχάνεται με παράγωγη του μεγαλύτερου μέρους αυτών των ενεργειών στην ίδια μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, το κάθε διυλιστήριο διαθέτει σύστημα συμπαραγωγής με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής και κυρίως θερμικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό καλύπτονται οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό καθώς και σε κινητική ενέργεια (συνδιασμός μηχανημάτων μετατροπής της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας σε κινητική) αλλά και σε θερμότητα. Οι συνήθεις τρόποι παραγωγής και μεταφοράς θερμικής ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω.

1.2 Κύρια Μέρη Παραγωγής Θερμότητας [2]

1.2.1 Φούρνοι (Combustion Furnaces)

Με τους φούρνους θερμαίνεται ένα υγρό με θερμότητα η οποία παράγεται από την καύση υγρού ή αερίου καυσίμου σε ειδικούς καυστήρες. Κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους, μορφές και μεγέθη ανάλογα με την εφαρμογή.

Οι δύο κυριότεροι τύποι φούρνων που χρησιμοποιούνται στα διυλιστήρια και στις χημικές βιομηχανίες είναι:

- *Οριζόντιος τύπος*
Οι αυλοί του τμήματος ακτινοβολίας είναι οριζόντιοι
- *Κάθετος τύπος*
Οι αυλοί του τμήματος ακτινοβολίας είναι κάθετοι

Μία άλλη κατάταξη των φούρνων γίνεται με βάση τον τρόπο με τον οποίο εισέρχεται ο αέρας στον χώρο καύσης. Έτσι έχουμε:

- *Φούρνοι φυσικού ελκυσμού*
Ο αέρας εισέρχεται στο φούρνο λόγω της υποπίεσης που δημιουργείται σ' αυτόν από την καμινάδα
- *Φούρνοι βεβιασμένου ελκυσμού*
Ο αέρας εισέρχεται στο φούρνο με τη βοήθεια ενός φυσητήρα

Για βελτιστοποίηση της απόδοσης η ροή του θερμαινόμενου υγρού είναι συνήθως αντίθετη από την ροή θερμών αερίων της καύσης. Τα αέρια κινούνται προς τα επάνω προς την καμινάδα και το ψυχρότερο υγρό εισέρχεται στο άνω μέρος του φούρνου (το τμήμα μεταφοράς) και εξέρχεται από το κάτω μέρος του κάτω τμήματος του φούρνου (τμήμα ακτινοβολίας). Με αυτήν τη διεύθυνση ροής το ψυχρότερο υγρό απορροφά αρχικά την ελάχιστη διαθέσιμη θερμότητα αερίων καύσης και στην συνέχεια τη μέγιστη που είναι διαθέσιμη στο χώρο καύσης των καυστήρων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η απόδοση του φούρνου.

Η σωστή λειτουργία των φούρνων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει ασφάλεια και μέγιστη δυνατή οικονομία. Για το λόγο αυτό, ο φούρνος πρέπει να ελέγχεται τακτικά και σωστά και οι κατάλληλοι χειρισμοί να γίνονται σωστά και έγκαιρα.

1.2.2 Λέβητες (Steam Boilers)

Οι λέβητες σε σχέση με τους φούρνους έχουν πολλές ομοιότητες τόσο στην παραγωγή της θερμότητας (καύση) όσο και στη μετάδοση της στο θερμαινόμενο ρευστό. Παρ' όλα αυτά έχουν μία σημαντική διαφορά, η οποία τους διαχωρίζει από τους φούρνους. Στους λέβητες το θερμαινόμενο υγρό (νερό) εξατμίζεται τελείως και μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό σε αντίθεση με τους φούρνους που θερμαίνουν και εξατμίζουν ένα μικρό ποσοστό του θερμαινόμενου υγρού. Στο λόγο αυτό οφείλεται και η τελείως διαφορετική διαδρομή που κάνει το θερμαινόμενο νερό.

Διαδρομή νερού – ατμού στο λέβητα

Το νερό τροφοδοσίας λεβήτων μεταφέρεται μέσω αντλιών από τον απαερωτή στον προθερμαντήρα και στη συνέχεια στον οικονομητήρα. Στον οικονομητήρα το νερό φτάνει την θερμοκρασία κορεσμού του ατμού. Στη συνέχεια οδηγείται στο άνω θερμοδοχείο του λέβητα, όπου και βρίσκεται σε ισορροπία με τον παραγόμενο ατμό. Ο καθαρός ατμός φεύγει από το θερμοδοχείο και οδηγείται στον υπερθερμαντήρα όπου και υπερθερμαίνεται. Τέλος οδηγείται στους κύριους αγωγούς της κατανάλωσης.

1.2.3 Εναλλάκτες Θερμότητας (Heat Exchangers)

Ο εναλλάκτης θερμότητας είναι μία διάταξη, στην οποία γίνεται μεταφορά θερμότητας από ένα ρεύμα θερμού ρευστού (υγρού ή αερίου) σε ένα ρεύμα ψυχρού ρευστού, χωρίς όμως να γίνεται ανάμειξη των δύο ρευστών.

Η θερμότητα είναι η ενέργεια που μεταδίδεται από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρότερο. Η μετάδοση της ενέργειας (μετάδοση θερμότητας) είναι δυνατή όταν υπάρχει μία θερμοκρασιακή διαφορά και γίνεται πάντοτε από περιοχές υψηλότερων θερμοκρασιών σε περιοχές χαμηλότερων θερμοκρασιών. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της μετάδοσης της θερμότητας παρουσιάζεται πτώση της θερμοκρασίας του θερμότερου σώματος και ανύψωση της θερμοκρασίας του ψυχρότερου σώματος. Η μετάδοση της θερμότητας συνεχίζεται μέχρι να γίνει εξίσωση των θερμοκρασιών, οπότε και δεν υπάρχει πλέον θερμοκρασιακή διαφορά που να προκαλεί τη μετάδοση της ενέργειας.

Η μετάδοση της θερμότητας σε μια θερμική διεργασία πραγματοποιείται με τους εναλλάκτες θερμότητας (Heat Exchangers), και γίνεται μεταξύ δύο ρευστών που χωρίζονται μεταξύ τους με ένα τοίχωμα συνήθως μεταλλικό. Ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας μεταξύ του θερμότερου και του ψυχρότερου ρευστού καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες των ρευστών, από τη ροή τους, τις θερμοκρασίες τους και από την επιφάνεια εναλλαγής της θερμότητας η οποία χωρίζει τα δύο ρευστά. Το κυριότερο μέγεθος υπολογισμού των εναλλακτών θερμότητας είναι η επιφάνεια εναλλαγής, δηλαδή η επιφάνεια δια της οποίας μεταδίδεται η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας. Για τον υπολογισμό της επιφάνειας εναλλαγής χρειάζεται να γνωρίζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας και τον συνολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Η μελέτη των εναλλακτών θερμότητας περιλαμβάνει και τους υπολογισμούς της πτώσης πίεσης, που για οικονομικούς λόγους δεν πρέπει να είναι υψηλή.

Τύποι εναλλακτών

Οι τρεις κυριότεροι τύποι εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στα διυλιστήρια και στις χημικές βιομηχανίες είναι:

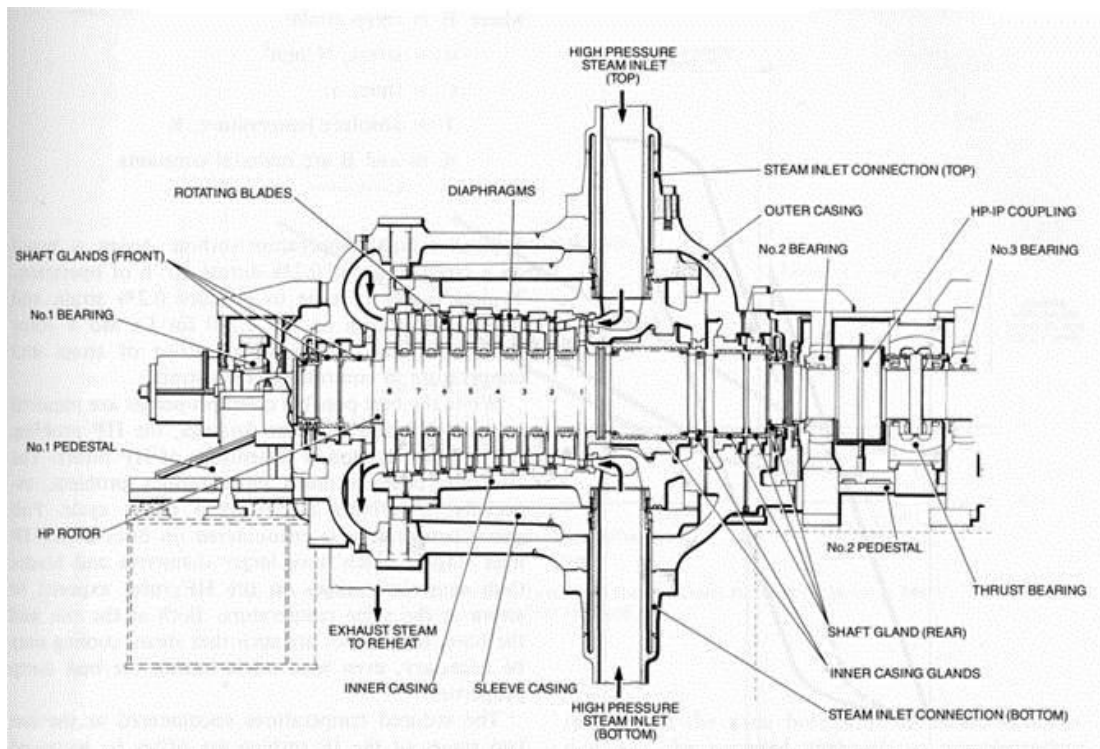
- *Οι εναλλάκτες κελύφους και σωλήνων (shell and tubes)*
Αποτελούνται από μία δέσμη παράλληλων σωλήνων μέσα από τους οποίους περνάει το ένα ρευστό, και ένα κέλυφος που περιβάλλει τους σωλήνες μέσα από το οποίο περνάει άλλο ρευστό.
- *Οι εναλλάκτες ομόκεντρων σωλήνων (double pipe)*
Αποτελούνται από δύο σωλήνες τον ένα μέσα στον άλλο. Ο εσωτερικός σωλήνας συνήθως φέρει πτερύγια για αύξηση της επιφάνειας μετάδοσης θερμότητας.
- *Οι αερόψυκτοι εναλλάκτες (air coolers)*
Η ψύξη επιτυγχάνεται με ένα ισχυρό ρεύμα αέρος που κινεί ένας μεγάλος ανεμιστήρας και περνάει μέσα από ένα σύστημα λεπτών σωλήνων.

1.3 Μηχανές Παραγωγής Ενέργειας [3]

1.3.1 Ατμοστρόβιλοι (Steam Turbines)

Ο ατμοστρόβιλος (steam turbine) είναι μία θερμική μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια του ατμού σε ωφέλιμο μηχανικό έργο. Στην απλή μορφή του αποτελείται από έναν άξονα πάνω στον οποίο προσαρμόζονται ένας ή περισσότεροι τροχοί με πτερύγια στην περιφέρειά τους. Πάνω στα πτερύγια του στροβίλου προσπίπτει ατμός ο οποίος λόγω ταχύτητάς του ή της εκτονωτικής του δύναμης προκαλεί την περιστροφή του άξονα, ο οποίος αποδίδει το κινητήριο έργο.

Οι ατμοστρόβιλοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παλινδρομικές μηχανές. Απαιτούν λιγότερο χώρο, θεμέλια ελαφρότερης κατασκευής και λιγότερη παρακολούθηση κατά την λειτουργία, έχουν πολύ μικρότερες απαιτήσεις λίπανσης, δεν έχουν άλλα τριβόμενα μέρη εκτός από τα έδρανα, παρουσιάζουν μεγάλη αξιοπιστία, έχουν μικρό κόστος συντήρησης, εξαιρετική ικανότητα ρύθμισης στοφών, χαμηλότερο κόστος αγοράς και κατασκευάζονται με ιπποδυνάμεις πολύ μεγαλύτερες των παλινδρομικών.



Σχήμα 1.2 : Μέρη ατμοστρόβιλου [4]

Κατηγορίες Ατμοστροβίλων

Ανάλογα με τον τύπο πτερυγώσεων που χρησιμοποιούνται

-Στρόβιλοι δράσεως (*Impulse Turbines*)

Στρόβιλοι με μηδενικό περίπου βαθμό αντίδρασης. Αυτοί είναι:

- Μονοβάθμιος στρόβιλος δράσεως
- Βαθμίδες ταχύτητας (Curtis)
- Βαθμίδες πίεσης (Rateau)

Στους στροβίλους δράσης τα πτερύγια της σταθερής πτερύγωσης είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να δημιουργούν ακροφύσια με σκοπό να επιταχύνουν τη διερχόμενη ροή, ενώ παράλληλα να μειώνουν την πίεση.

-Στρόβιλοι αντιδράσεως (*Reaction Turbines, Parson*)

Στρόβιλοι με βαθμό αντίδρασης μεγαλύτερο του μηδενός. Ανάλογα με το βαθμό αντίδρασης έχουμε μείωση της πίεσης τόσο στον ρότορα όσο και στον στάτορα, εκτός από την περίπτωση που ο βαθμός αντίδρασης είναι 100% και τότε όλη η μεταβολή πίεσης γίνεται στον ρότορα.

Με κριτήριο τις συνθήκες τροφοδοσίας-εξόδου

-Ατμοστρόβιλοι συμπυκνώσεως

Η έξοδος του ατμοστροβίλου γίνεται στον συμπυκνωτή, στον οποίο έχουμε την υγροποίηση του ατμού. Ο συμπυκνωτής βρίσκεται σε πολύ χαμηλή πίεση, αρκετά χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική ($P_{\text{cond}}=0,025-0,05 \text{ bar}$).

- Ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης

Ο ατμός στην έξοδο έχει σχετικά υψηλή πίεση και θερμοκρασία, για τροφοδοσία διεργασιών με ατμό ή ακόμα και ενός άλλου ατμοστροβίλου ($P_{\text{cond}}=1-6 \text{ bar}$).

-Ατμοστρόβιλοι με απομαστεύσεις για εξωτερική τροφοδοσία

Μέρος του ατμού απομαστεύεται από κάποια ενδιάμεση πίεση του ατμοστροβίλου και χρησιμοποιείται για άλλες χρήσεις.

Με κριτήριο τη γενική διάταξη της ροής

Χωρίζονται σε απλής και διπλής ροής.

Με κριτήριο την πίεση τροφοδοσίας

Χωρίζονται σε χαμηλής, μέσης, υψηλής, υπέρ υψηλής και υπερκρίσιμης πίεσης.

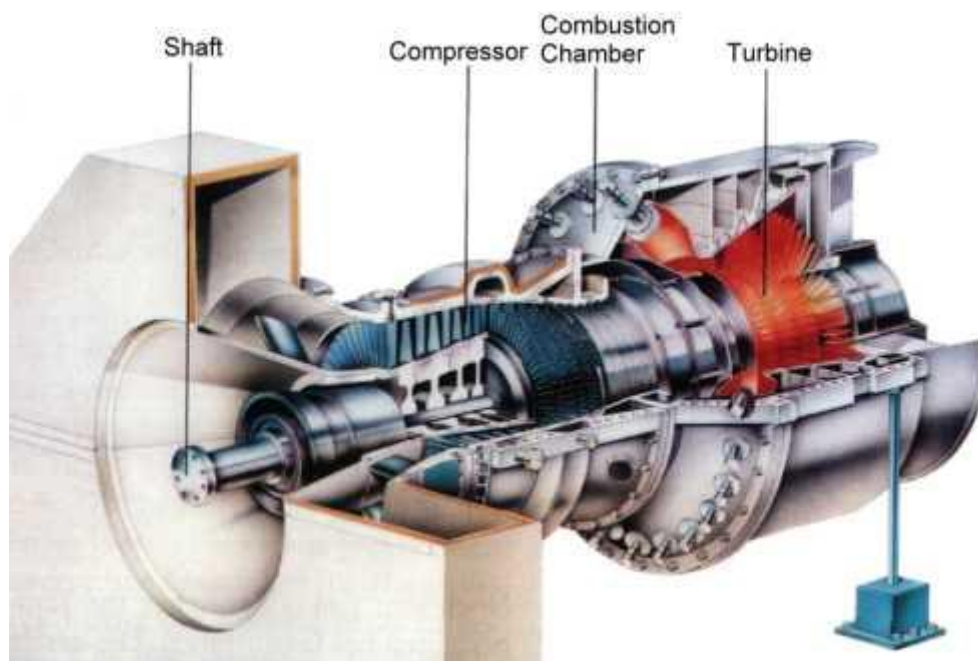
Με κριτήριο την ταχύτητα περιστροφής

Χωρίζονται σε σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας ή σε κανονικής, χαμηλής και υψηλής ταχύτητας.

1.3.2 Αεριοστρόβιλοι (Gas Turbines)

Ο αεριοστρόβιλος είναι μία θερμική μηχανή, δηλαδή μία μηχανή που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική. Η θερμική ενέργεια παράγεται με την καύση ενός καυσίμου με το οξυγόνο του αέρα. Εν τούτοις, στον αεριοστρόβιλο, όπως και σε κάθε άλλη θερμική μηχανή, μόνο ένα μέρος της αρχικής ενέργειας μετατρέπεται σε μηχανική. Η υπόλοιπη αποδίδεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Η απόδοση της μηχανής είναι το ποσοστό της αρχικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο (μηχανική ενέργεια). Στους αεριοστρόβιλους η απόδοση αυτή κυμαίνεται σε 25 – 40%. Το υπόλοιπο 60 – 75% διαχέεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμικών απωλειών. Όταν ένα τμήμα αυτών των απωλειών ανακτάται (όπως π.χ. από έναν εναλλάκτη θερμότητας) η απόδοση της μηχανής αυξάνει ανάλογα.

Σε έναν απλό αεριοστρόβιλο, ο αέρας περιβάλλοντος αναρροφάται και συμπιέζεται σε έναν συμπιεστή, στη συνέχεια θερμαίνεται σε ένα χώρο καύσης και τέλος εκτονώνεται σε έναν στρόβιλο και καταλήγει στην ατμόσφαιρα. Με την εκτόνωση του στον στρόβιλο παράγεται ωφέλιμο έργο, δηλαδή αφ' ενός γίνεται συντήρηση της περιστροφής του συμπιεστή και αφ' ετέρου περιστρέφεται το στροφέιο του στροβίλου, το οποίο στο συνέχεια περιστρέφει μία γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 1.3 : Μέρη αεριοστρόβιλου [5]

Τύποι Αεριοστρόβιλων

-Διάταξη απλής ατράκτου (*single shaft*)

Σε αυτή τη διάταξη η άτρακτος που συνδέει τον συμπιεστή και τον στρόβιλο είναι συνδεδεμένη απ' ευθείας με το φορτίο.

-Διάταξη διδύμων ατράκτων (*twin shaft*)

Σε αυτή τη διάταξη υπάρχει ένας στρόβιλος που παράγει ακριβώς την ισχύ που χρειάζεται για να κινηθεί ο συμπιεστής, με τον οποίο είναι συνδεδεμένος μέσω της πρώτης ατράκτου της μηχανής. Το συγκεκριμένο τμήμα της μηχανής ονομάζεται αεριογόνος (*gas generator*). Αμέσως μετά από το συγκρότημα συμπιεστή – στροβίλου υπάρχει ένας δεύτερος στρόβιλος ο οποίος συνδέεται μέσω δεύτερης ανεξάρτητης ατράκτου με το φορτίο. Ο δεύτερος αυτός στρόβιλος παράγει μόνο την ισχύ που απαιτεί το φορτίο και ονομάζεται ελεύθερος στρόβιλος (*free turbine*) ή στρόβιλος ισχύος (*power turbine*).

-Διάταξη διπλής ατράκτου (*twin spool engine*)

Σε αυτή τη διάταξη ο συμπιεστής χωρίζεται σε δύο επί μέρους συμπιεστές με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής. Τα δύο τμήματα του συμπιεστή περιστρέφονται πάνω σε δύο διαφορετικές ομόκεντρες ατράκτους και καθ' ένα τους κινείται από το αντίστοιχο τμήμα του στροβίλου.

1.4 Τεχνολογίες Συμπαγωγής [6]

Οι τεχνολογίες συμπαγωγής, οι οποίες έχουν εφαρμογή στα σύγχρονα Διυλιστήρια, χαρακτηρίζονται από το λόγο της ηλεκτρικής προς τη θερμική ενέργεια, ενώ μπορούν να περιλαμβάνουν είτε εσωτερική είτε εξωτερική καύση.

1.4.1 Συστήματα Συμπαγωγής με Ατμοστρόβιλο

Τα συστήματα συμπαγωγής με τη χρήση ατμοστρόβιλου εφαρμόζονται σε εύρη ισχύος μεταξύ 500 kW έως και πάνω από 100 MW. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευελιξία στη χρήση του καυσίμου, δεδομένου ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν αέρια, υγρά καθώς και στερεά καύσιμα. Ο ολικός βαθμός απόδοσης τέτοιων μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 60% - 80%.

Τα συστήματα συμπαγωγής με ατμοστρόβιλο συναντώνται πολύ συχνά στην περίπτωση αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων. Βασικός δείκτης για την επιλογή ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί η επιθυμητή ευελιξία του συστήματος, η οποία εκφράζεται με το λόγο ηλεκτρικής προς θερμική ισχύ (λόγος σ).

1.4.1.1 Συστήματα Συμπαραγωγής με Ατμοστρόβιλο Αντίθλιψης

Σε λέβητα παράγεται ατμός υψηλών θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών, ο οποίος εκτονώνεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο ατμοστρόβιλο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδιαιτερότητα του στρόβιλου αντίθλιψης αποτελεί η πίεση του ατμού στην έξοδό του, η οποία είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Λόγω της υψηλής πίεσης, αλλά και της θερμοκρασίας του, ο ατμός από έναν στρόβιλο αντίθλιψης είναι κατάλληλος για διάφορες θερμικές διεργασίες.

Πλεονεκτήματα συστήματος ατμοστρόβιλου αντίθλιψης

- Υψηλότερος βαθμός απόδοσης συγκριτικά με άλλα συστήματα ατμοστρόβιλων
- Μικρή ανάγκη ψυκτικού μέσου
- Χαμηλό κόστος
- Απλή μορφή

Μειονεκτήματα συστήματος ατμοστρόβιλου αντίθλιψης

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παραγωγή θερμότητας (λειτουργία με σταθερό λόγο ηλεκτρικής προς θερμική ενέργεια)

1.4.1.2 Συστήματα Συμπαραγωγής με Ατμοστρόβιλο Συμπύκνωσης με Απομάστευση

Όπως και στα συστήματα με στρόβιλο αντίθλιψης, παράγεται ατμός υψηλών θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών σε λέβητα, ο οποίος εκτονώνεται σε κατάλληλα διαμορφωμένο ατμοστρόβιλο με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορά αυτού του συστήματος είναι το γεγονός ότι η θερμική ενέργεια παράγεται από ποσότητα ατμού η οποία απομαστεύεται από ενδιάμεση βαθμίδα του στρόβιλου και στη συνέχεια οδηγείται στη θερμική κατανάλωση. Η υπόλοιπη ποσότητα του ατμού εκτονώνεται πλήρως στο στρόβιλο. Τα συμπυκνώματα από το συμπυκνωτή και τη θερμική κατανάλωση οδηγούνται στο τροφοδοτικό δοχείο, από το οποίο μέσω της τροφοδοτικής αντλίας οδηγούνται πάλι στο λέβητα για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού.

Πλεονεκτήματα συστήματος ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης με απομάστευση

- Δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης της ηλεκτρικής και της θερμικής ισχύος (λειτουργία με μεταβαλλόμενο λόγο ηλεκτρικής προς θερμική ενέργεια)

Μειονεκτήματα συστήματος ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης με απομάστευση

- Χαμηλότερος συνολικός βαθμός απόδοσης σε σύγκριση με τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης
- Ακριβότερη τεχνολογία

1.4.2 Συστήματα Συμπαραγωγής με Αεριοστρόβιλο

Τα συστήματα συμπαραγωγής με τη χρήση αεριοστροβίλου διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στα συστήματα ανοικτού τύπου και στα συστήματα κλειστού τύπου.

1.4.2.1 Συστήματα Συμπαραγωγής με Αεριοστρόβιλο Ανοικτού Κύκλου

Σε μία αεριοστροβλική μονάδα ανοικτού κύκλου πραγματοποιείται καύση καυσίμου που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης με αέρα πεπιεσμένο από το συμπιεστή, ενώ τα καυσαέρια εκτονώνονται στο στρόβιλο. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των συστημάτων, για καθαρή ηλεκτροπαραγωγή, είναι της τάξης του 35%. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι τόσο χαμηλός εξαιτίας της ισχύος που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή καθώς και των μεγάλων θερμικών απωλειών από τα θερμά καυσαέρια.

Πλεονεκτήματα συστήματος αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου

- Υψηλός βαθμός απόδοσης (60% - 80%)
- Υψηλές θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων (ιδανικό σύστημα για συμπαραγωγή)

Μειονεκτήματα συστήματος αεριοστροβίλου ανοικτού κύκλου

- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παραγωγή θερμότητας (λειτουργία με σταθερό λόγο ηλεκτρικής προς θερμική ισχύ)

1.4.2.2 Συστήματα Συμπαραγωγής με Αεριοστρόβιλο Κλειστού Κύκλου

Σε μία αεριοστροβλική μονάδα κλειστού κύκλου, το ρευστό, μετά τη συμπίεση του, θερμαίνεται με χρήση εναλλάκτη θερμότητας μέχρι κάποια επιθυμητή θερμοκρασία και μετά εκτονώνεται στο στρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας. Μετά την έξοδο από το στρόβιλο το ρευστό οδηγείται σε άλλον εναλλάκτη, με σκοπό την ψύξη του και την εκ νέου εισαγωγή του στο συμπιεστή προκειμένου να επαναληφθεί ο κύκλος. Ως εργαζόμενο μέσο, στα συστήματα κλειστού τύπου, χρησιμοποιείται συνήθως αέρας ή ήλιο.

Πλεονεκτήματα συστήματος αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου

- Δεν υπάρχει μηχανική και χημική διάβρωση (εξωτερική καύση)
- Δεν υπάρχει περιορισμός στο καύσιμο

Μειονεκτήματα συστήματος αεριοστροβίλου κλειστού κύκλου

- Χαμηλός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στους εναλλάκτες
- Μεγάλη επιφάνεια συναλλαγής (υψηλό κόστος, προβλήματα στη στεγανότητα)

1.4.3 Συστήματα Συμπαραγωγής με Συνδιασμένο Κύκλο Αεριοστροβίλου-Ατμοστροβίλου

Στην περίπτωση συνδιασμένου κύκλου αεριοστροβίλου- ατμοστροβίλου επιτυγχάνουμε επίσης συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα συνδυασμό των δύο προηγούμενων συστημάτων τόσο για τα πλεονεκτήματά τους, όσο και για τα μειονεκτήματά τους.

1.4.4 Συστήματα Συμπαραγωγής με Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Τα συστήματα συμπαραγωγής με χρήση εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο, αλλά και την ισχύ της παλινδρομικής μηχανής που χρησιμοποιούν. Χωρίζονται σε μονάδες μικρής κλίμακας (έως 1MW), σε μονάδες μεσαίας κλίμακας (από 1 έως 6 MW) και σε μονάδες μεγάλης κλίμακας (από 6 MW και άνω). Ο βαθμός απόδοσης των μικρών και μεσαίων εμβολοφόρων κινητήρων κυμαίνεται μεταξύ 35% - 45%, ενώ των σύγχρονων κινητήρων μεγάλης ισχύος αγγίζει το 50%.

Οι μονάδες συμπαραγωγής με εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης συναντώνται πολύ συχνά σε κτήρια (π.χ. νοσοκομεία) ή σε περιπτώσεις αποκεντρωμένων ενεργειακών συστημάτων.

Η μηχανή εσωτερικής καύσης καίει καύσιμο εντός των κυλίνδρων της και αξιοποιώντας το έργο που παράγεται από την καύση, το μετατρέπει σε μηχανικό έργο στον άξονά της. Το έργο αυτό μεταφέρεται στον άξονα της γεννήτριας, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια.

Η θερμική ενέργεια παράγεται αξιοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα του κινητήρα. Η θερμότητα αυτή προέρχεται ως επί το πλείστον από τα καυσαέρια της μηχανής. Παράλληλα όμως, μία εμβολοφόρος μηχανή, έχει και άλλα εξαρτήματα για την απόρριψη θερμότητας από το σύστημά της, όπως είναι τα διάφορα ψυγεία (ψυγείο νερού, λαδιού και αέρα υπερπλήρωσης). Η διαδικασία της παραγωγής θερμότητας εκκινεί με την απαγωγή θερμότητας από τα ψυγεία και κατόπιν ακολουθεί υπερθέρμανση του εργαζόμενου μέσου με τη βοήθεια των καυσαερίων.

1.4.5 Άλλες Τεχνολογίες Συμπαραγωγής

Άλλες τεχνολογίες συμπαραγωγής που χρησιμοποιούνται για τη συμπαγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας είναι:

- ❖ Μικροστρόβιλος
- ❖ Μηχανή Stirling
- ❖ Κυψέλη καυσίμου
- ❖ Αεριομηχανή
- ❖ Οργανικός κύκλος Rankine

Κεφάλαιο 2. Θερμοδυναμική Ανάλυση και Εξεργειακή Ανάλυση

2.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση

Η θερμοδυναμική είναι η επιστήμη, η οποία ασχολείται με τη σχέση μεταξύ της θερμότητας και τις άλλες μορφές ενέργειας (όπως μηχανική, ηλεκτρική ή χημική ενέργεια) και κατ' επέκταση με τη σχέση μεταξύ όλων των μορφών ενέργειας.

2.1.1 Θερμοδυναμικά Αξιώματα [6] , [7]

2.1.1.1 Μηδενικό Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Αν ένα σώμα A είναι σε θερμική ισορροπία με ένα σώμα B και αν το σώμα B είναι σε θερμική ισορροπία με ένα σώμα Γ , τότε το σώμα A είναι σε θερμική ισορροπία με το σώμα Γ . Αυτό συνεπάγεται ότι αν το σώμα A έρθει σε επαφή με το σώμα Γ , τότε δεν θα υπάρξει καμία μετάδοση θερμότητας από το ένα σώμα στο άλλο.

2.1.1.2 Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Σύμφωνα με το αξίωμα αυτό ισχύει η διατήρηση της ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται ότι το άθροισμα των προσδιδόμενων ποσών ενέργειας σε ένα σύστημα ισούται με το ποσό των εξερχόμενων ποσών ενέργειας από ένα σύστημα.

2.1.1.3 Δεύτερο Θερμοδυναμικό Αξίωμα

Το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα εκφράζεται με δύο αρχές:

Αρχή Clausius

Η θερμότητα μεταφέρεται από ένα θερμό μέσο σε ένα ψυχρό, χωρίς καμία απαίτηση. Η αντίθετη ροή θερμότητας είναι δυνατή μόνο με την πρόσδοση έργου στο σύστημα.

Αρχή Kelvin

Δεν είναι δυνατή η παραγωγή έργου με απορρόφηση θερμότητας από μία θερμή δεξαμενή, χωρίς την απόρριψη θερμότητας σε μία ψυχρή δεξαμενή, ή με άλλα λόγια, δεν υπάρχει μηχανή η οποία να μετατρέπει τη θερμότητα σε έργο κατά 100%.

2.1.2 Κύκλος Carnot [6] , [7]

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Carnot αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο ισηντροπικές μεταβολές. Πρόκειται ουσιαστικά για τον ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο με το βέλτιστο θερμικό βαθμό απόδοσης μεταξύ δύο θερμοκρασιακών επιπέδων.

2.1.3 Κύκλος Clausius – Rankine [6] , [7]

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Clausius – Rankine για κύκλωμα νερού – ατμού ακολουθεί την εξής διεργασία. Το νερό, με τη βοήθεια της τροφοδοτικής αντλίας και αύξηση της πίεσής του, οδηγείται στον ατμοπαραγωγό. Εκεί το νερό προθερμαίνεται, ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται υπό σταθερή πίεση. Από τον ατμοπαραγωγό, ο υπέρθερμος ατμός οδηγείται στο στρόβιλο όπου αποτονώνεται με απόδοση έργου σε μία γεννήτρια. Στη συνέχεια εισάγεται στο συμπυκνωτή όπου ψύχεται και υγροποιείται.

2.1.3.1 Θερμοδυναμικός Κύκλος

0-1 Αύξηση πίεσης τροφοδοτικού νερού

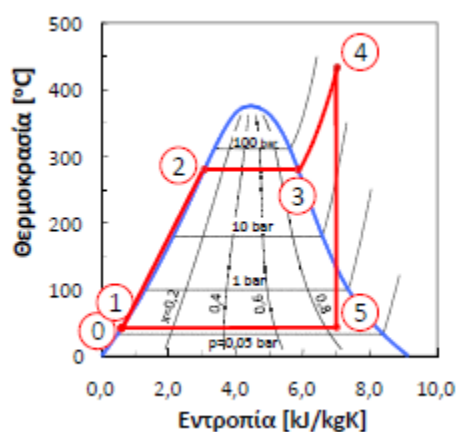
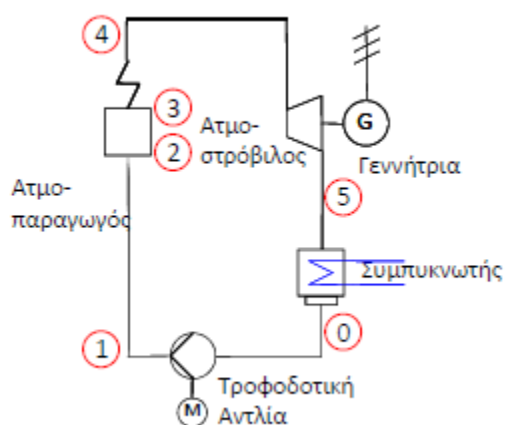
1-2 Προθέρμανση νερού μέχρι θερμοκρασία ατμοποίησης

2-3 Ατμοποίηση νερού

3-4 Υπερθέρμανση νερού

4-5 Εκτόνωση νερού στο στρόβιλο

5-0 Συμπύκνωση ατμού

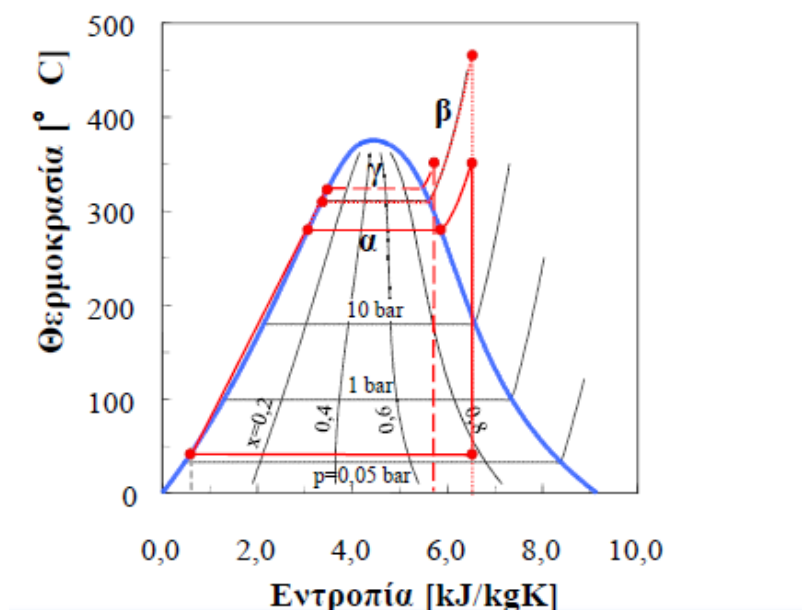


Σχήμα 2.1 : Θερμοδυναμικός κύκλος Clausius – Rankine [8]

2.1.3.2 Αύξηση Θερμικού Βαθμού Απόδοσης

2.1.3.2.1 Αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου

Βελτίωση του βαθμού απόδοσης είναι δυνατή με ύψωση της πίεσης και της θερμοκρασίας λειτουργίας του ατμοπαραγωγού και με μείωση της πίεσης του συμπυκνωτή (και κατ' επέκταση μείωση της θερμοκρασίας συμπυκνώματος). Αυξάνεται έτσι το $E_{0123450}$ και άρα και τα Δw_t , η_{th} . Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των μεταβολών αυτών.

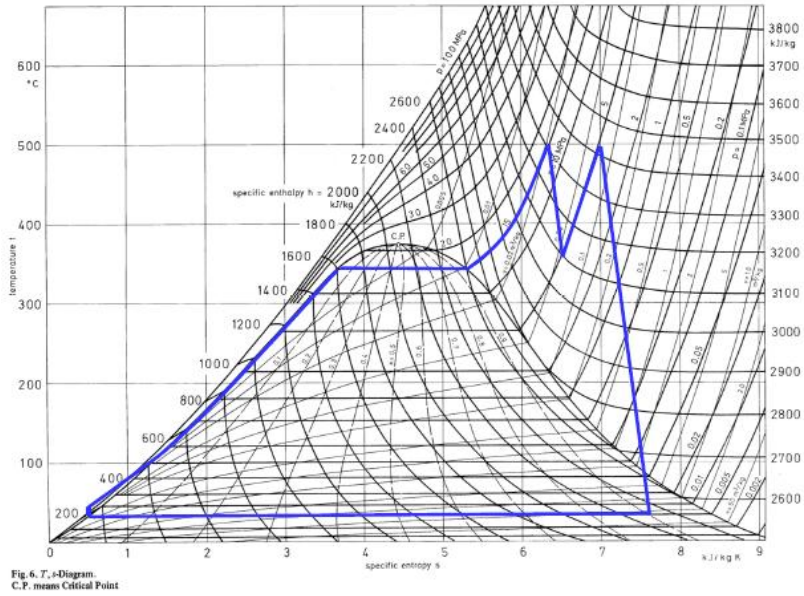


Σχήμα 2.2 : Αύξηση πίεσης και θερμοκρασίας ατμού [8]

- α) Αρχικός κύκλος
- β) Αύξηση πίεσης
- γ) Αύξηση θερμοκρασίας

2.1.3.2.2 Ενδιάμεση αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου

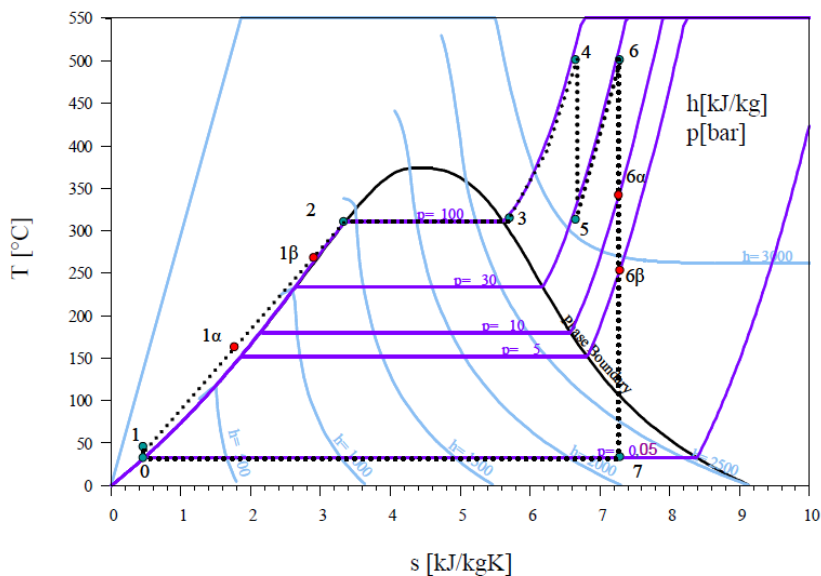
Η αναθέρμανση του ατμού πραγματοποιείται αφού γίνει μία πρώτη αποτόνωση του στις βαθμίδες υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου. Η θερμοκρασία αναθέρμανσης είναι παρόμοια με τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης. Στη συνέχεια ο ατμός οδηγείται στις υπόλοιπες βαθμίδες (μέσης και χαμηλής πίεσης) του ατμοστροβίλου. Η αναθέρμανση του ατμού οδηγεί στην αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου, αφού, με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η μέση θερμοκρασία πρόσδοσης θερμότητας. Ακόμα, λόγω της αναθέρμανσης προκύπτει αύξηση της ξηρότητας του ατμού μετά την αποτόνωση και την είσοδο του στον συμπυκνωτή, με αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία των τελευταίων βαθμίδων του στροβίλου χαμηλής πίεσης και την αύξηση του βαθμού απόδοσης του ατμοστροβίλου. Συνήθως γίνονται μία ή δύο αναθερμάνσεις.



Σχήμα 2.3 : Ενδιάμεση αναθέρμανση ατμού [8]

2.1.3.2.3 Αναγεννητική προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου

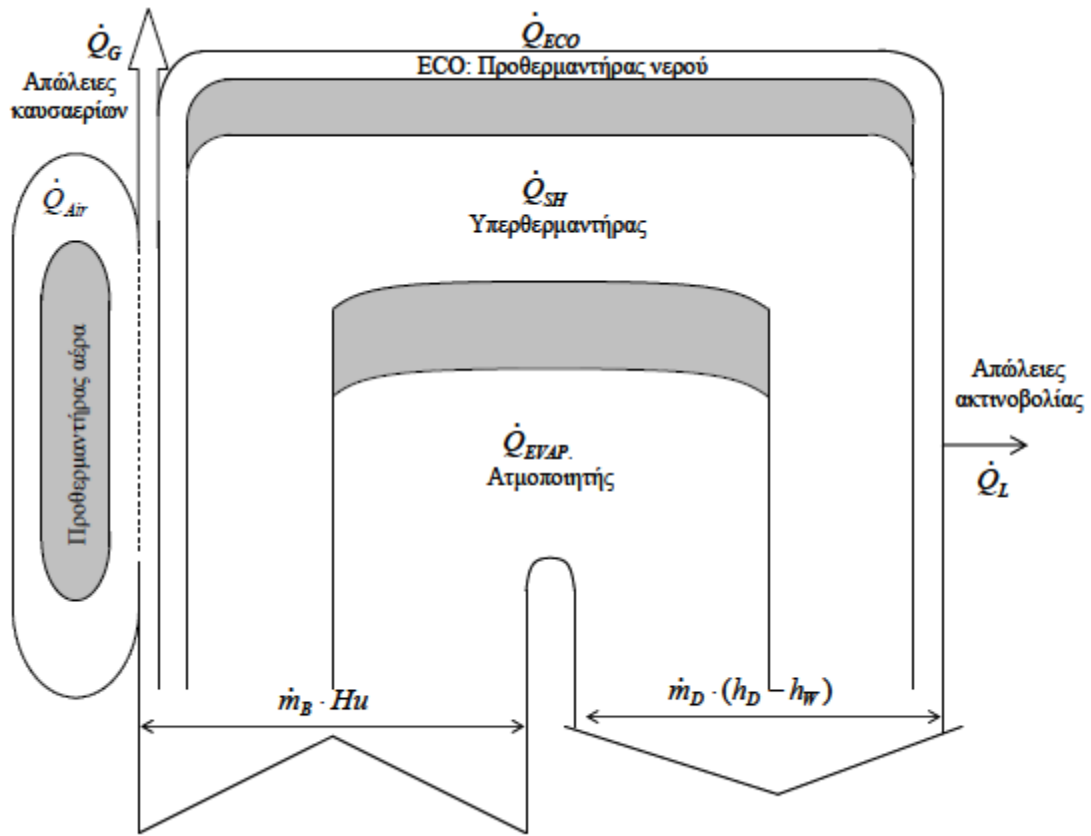
Για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού απομαστεύεται ατμός από κάποιες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου. Αξιοποιείται έτσι η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης την οποία θα προσλάμβανε το νερό ψύξης. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μικρότερη ποσότητα ατμού συμπίκνωσης στην έξοδο του στρόβιλου. Για το λόγο αυτό απαιτούνται μικρότερες ποσότητες νερού ψύξης και μειώνονται οι απώλειες θερμότητας που προέρχονται από την απαγωγή της λανθάνουσας θερμότητας του νερού από το ψυκτικό μέσο. Παράλληλα όμως, μειώνεται και η αποδιδόμενη ενέργεια στον ατμοστρόβιλο, αφού, λόγω της απομάστευσης του ατμού από τις ενδιάμεσες βαθμίδες, μειώνεται η ποσότητα του ατμού που αποτονώνεται στο στρόβιλο.



Σχήμα 2.4 : Αναγεννητική προθέρμανση ατμού [8]

2.1.4 Διάγραμμα Sankey [6] , [7]

Το διάγραμμα Sankey αποτελεί το γραφικό τρόπο παρουσίασης της ροής ενέργειας σε ένα σύστημα.



Σχήμα 2.5 : Παράδειγμα διαγράμματος Sankey [8]

2.2. Εξεργειακή Ανάλυση

Για τη σωστή και πλήρη ανάλυση των θερμικών και χημικών συστημάτων πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποιότητα των διαφόρων μορφών ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μέθοδο της εξεργειακής ανάλυσης. Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στον εντοπισμό των σημείων μιας εγκατάστασης, στα οποία υπάρχει καταστροφή εξέργειας.

Κάθε πόσο ενέργειας αποτελείται από εξέργεια και ανέργεια και ένα από τα δύο μέρη μπορεί να είναι ίσο με μηδέν. Ισχύει επομένως για κάθε μορφή ενέργειας η γενική εξίσωση:
ενέργεια = εξέργεια + ανέργεια

Επομένως το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα στη διατύπωσή του σαν αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

Σε όλες τις διεργασίες το άθροισμα της εξέργειας και της ανέργειας παραμένει σταθερό.

2.2.1 Ορισμός Εξέργειας [9]

Εξέργεια μιας δεδομένης μορφής ενέργειας είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να παραχθεί από την ενέργεια αυτή με κατάσταση αναφοράς εκείνη του περιβάλλοντος.

Πρόκειται ουσιαστικά για ένα μέτρο του πόσο απέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα από το περιβάλλον. Ως περιβάλλον (πραγματικό περιβάλλον, δηλώνεται με τον δείκτη '0') ορίζεται αυτό με θερμοκρασία $T_0=25^{\circ}\text{C}$ και πίεση $P_0=1.01315\text{ bar}$.

Να τονισθεί επίσης ότι η εξέργεια παραμένει σταθερή μόνο σε αντιστρεπτές διεργασίες. Ωστόσο, οι πραγματικές διεργασίες, είναι μη αντιστρεπτές και για το λόγο αυτό συνοδεύονται από καταστροφή εξέργειας.

2.2.2 Εξέργεια Έργου [9]

Η εξέργεια μίας ποσότητας έργου W είναι ίση ακριβώς με το έργο αυτό.

2.2.3 Θερμική Εξέργεια [9]

Η εξέργεια θερμότητας Q που μεταφέρεται διαμέσου μίας επιφάνειας συναλλαγής θερμοκρασίας T_A ισούται με το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί από τη θερμότητα αυτή, χρησιμοποιώντας το περιβάλλον ως ένα θερμοδοχείο μηδενικής θερμικής ενέργειας.

Η θερμική εξέργεια δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon^Q = \int_0^Q Q \left(1 - \frac{T_0}{T_A}\right) dQ \quad (2.1)$$

2.2.4 Εξέργεια Συστήματος [9]

Εξέργεια θερμοδυναμικού συστήματος είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί όταν από την αρχική του κατάσταση το σύστημα έρθει στη νεκρή κατάσταση, αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.

Η εξέργεια συστήματος δίνεται από την σχέση:

$$\mathcal{E} = E + P_0V - T_0S - \sum_i \mu_{i00} n_i \quad (2.2)$$

όπου

E η ολική ενέργεια του συστήματος

$$E = U + E^{KN} + E^{KN} + \dots \quad (2.3)$$

U η εσωτερική ενέργεια

E^{KN} η κινητική ενέργεια

$$E^{KN} = mC^2/2 \quad (2.4)$$

C η ταχύτητα του συστήματος

E^{PT} η δυναμική ενέργεια

$$E^{PT} = mg_e Z \quad (2.5)$$

g_e η επιτάχυνση της βαρύτητας

Z το υψόμετρο

... οι άλλες μορφές ενέργειας

V ο όγκος του συστήματος στην αρχική κατάσταση

S η εντροπία του συστήματος στην αρχική κατάσταση

μ_{i00} το χημικό δυναμικό του σώματος i ως συστατικού του περιβάλλοντος

n_i ο αριθμός γραμμομορίων του συστατικού i στο σύστημα

Αναλύοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους της εξίσωσης (2.2) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}^{PH} + \mathcal{E}^{KN} + \mathcal{E}^{PT} + \dots + \mathcal{E}^{CH} \quad (2.6)$$

όπου

Ξ^{PH} η φυσική εξέργεια, δηλαδή το έργο που παράγεται από μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας

$$\Xi^{PH} = (U - U_0) + P(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.7)$$

Ξ^{KN} η κινητική εξέργεια

$$\Xi^{KN} = E^{KN} - E_0^{KN} = mC^2/2 \quad (2.8)$$

Ξ^{PT} η δυναμική εξέργεια

$$\Xi^{PT} = E^{PT} - E_0^{PT} = mg_e Z \quad (2.9)$$

Ξ^{CH} η χημική εξέργεια

$$\Xi^{CH} = E^{CH} - E_0^{CH} = \sum_i (\mu_{i0} - \mu_{i00}) n_i \quad (2.10)$$

Η τελευταία ισότητα των εξισώσεων (2.8), (2.9) ισχύει για σύστημα αναφοράς ακίνητο και σύστημα αναφοράς σε μηδενικό υψόμετρο αντίστοιχα.

Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για την ειδική εξέργεια ξ , δηλαδή την εξέργεια ανά μονάδα μάζας του σώματος.

$$\xi = \xi^{PH} + \xi^{KN} + \xi^{PT} + \dots + \xi^{CH} \quad (2.11)$$

2.2.5 Εξέργεια Ροής [9]

Εξέργεια ρευστού που ρέει σε σταθερή ροή είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί, όταν από την αρχική του κατάσταση το ρευστό έρθει στη νεκρή κατάσταση, αλληλεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον.

Η εξέργεια ροής δίνεται από τη σχέση:

$$E = \Xi + (P - P_0)V \quad (2.12)$$

όπου

PV το έργο εξώθησης

P_0V το έργο που δαπανάται για την υπερνίκηση της πίεσης του περιβάλλοντος

Με όμοιο τρόπο η εξέργεια χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα:

$$E = E^{PH} + E^{KN} + E^{PT} + \dots + E^{CH} \quad (2.13)$$

όπου

E^{PH} η φυσική εξέργεια, δηλαδή

$$E^{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (2.14)$$

E^{KN} η κινητική εξέργεια

E^{PT} η δυναμική εξέργεια

E^{CH} η χημική εξέργεια

Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για την ειδική εξέργεια ε , δηλαδή την εξέργεια ανά μονάδα μάζας του σώματος.

$$\varepsilon = \xi + (P - P_0)u \quad (2.15)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^{PH} + \varepsilon^{KN} + \varepsilon^{PT} + \dots + \varepsilon^{CH} \quad (2.16)$$

2.2.6 Χημική Εξέργεια [9]

Χημική εξέργεια σώματος (είτε χημικού στοιχείου, είτε χημικής ένωσης είτε μίγματος στοιχείων και ενώσεων) είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί, όταν από αρχική κατάσταση μηχανικής και θερμικής ισορροπίας με το περιβάλλον το σώμα έρθει στη νεκρή κατάσταση με διεργασίες που περιλαμβάνουν συναλλαγή θερμότητας και μάζας μόνο με το περιβάλλον.

Αντίστροφη διεργασία

Χημική εξέργεια είναι το ελάχιστο έργο που απαιτείται για να σχηματιστεί ένα σώμα από συστατικά του περιβάλλοντος και να δοθεί στην κατάσταση του περιβάλλοντος, με διεργασίες που περιλαμβάνουν συναλλαγή θερμότητας και μάζας μόνο με το περιβάλλον.

Η χημική εξέργεια προσδιορίζεται με βάση τη διαφορά μεταξύ του χημικού δυναμικού του σώματος και εκείνου κατάλληλα διαλεγμένων συστατικών του περιβάλλοντος (σώματα αναφοράς). Το σώμα αναφοράς ενός χημικού στοιχείου είναι εκείνο από τα συστατικά του περιβάλλοντος με το χαμηλότερο χημικό δυναμικό.

Να επισημανθεί ότι, αντί του (CH) στο σύμβολο της χημικής εξέργειας χρησιμοποιείται το (0), δεδομένου του ότι, σύμφωνα με τον ορισμό, η χημική εξέργεια είναι το μέγιστο έργο που μπορεί να παραχθεί εάν το σύστημα από κατάσταση περιορισμένης ισορροπίας έρθει σε χημική ισορροπία με το περιβάλλον.

Επίσης, με τον δείκτη (⁰) δηλώνουμε την πρότυπη χημική εξέργεια, δηλαδή τη χημική εξέργεια στην πρότυπη πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ με τον δείκτη (0) δηλώνουμε τη χημική εξέργεια σε οποιαδήποτε άλλη πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η χημική εξέργεια αερίων σωμάτων αναφοράς δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\varepsilon}_0 = \tilde{R}T_0 \ln \frac{P_0}{P_{00}} \quad (2.17)$$

όπου

$\tilde{\varepsilon}_0$ η γραμμομοριακή χημική εξέργεια

\tilde{R} η γενική σταθερά των αερίων

P_{00} η μερική πίεση του αερίου στην ατμόσφαιρα

Η χημική εξέργεια χημικών ενώσεων προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\varepsilon}^0 = \tilde{g}_f^0 + \sum_i \nu_i \tilde{\varepsilon}_i^0 \quad (2.18)$$

όπου

\tilde{g}_f^0 η συνάρτηση Gibbs σχηματισμού της ένωσης

ν_i ο αριθμός μορίων του στοιχείου i στην ένωση

$\tilde{\varepsilon}_i^0$ η γραμμομοριακή χημική εξέργεια του στοιχείου i

Η χημική εξέργεια βιομηχανικών καυσίμων δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{\varepsilon}^0 = -\Delta\tilde{g}^0 + \tilde{R}T^0 \left(\nu_{O_2} \ln \frac{P_{O_2}^{00}}{P^0} - \sum_k \nu_k \ln \frac{P_k^{00}}{P^0} \right) \quad (2.19)$$

όπου

$\Delta\tilde{g}^0$ η συνάρτηση Gibbs της αντίδρασης

$$\Delta\tilde{g}^0 = \Delta\tilde{h}^0 - T^0 \Delta\tilde{s}^0 = \sum_k \nu_k (\tilde{g}_f^0)_k - \sum_j \nu_j (\tilde{g}_f^0)_j \quad (2.20)$$

$\Delta\tilde{h}^0$ η ενθαλπία της αντίδρασης

$\Delta\tilde{s}^0$ η εντροπία της αντίδρασης

\tilde{g}_f^0 η συνάρτηση Gibbs σχηματισμού

$(^0)$ οι πρότυπες συνθήκες περιβάλλοντος

$(^{00})$ η πρότυπη νεκρή κατάσταση

ν οι στοιχειομετρικοί συντελεστές

k ο δείκτης που αναφέρεται στα προϊόντα της καύσης

j ο δείκτης που αναφέρεται στα αντιδρώντα σώματα

Για τα καύσιμα των οποίων η σύνθεση δεν είναι ακριβώς γνωστή, ισχύει:

$$\varepsilon^0 = \varphi H_u^0 \quad (2.21)$$

όπου

H_u^0 η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου σε πρότυπες συνθήκες περιβάλλοντος

φ ο συντελεστής που προσδιορίζεται από ημιεμπειρικές σχέσεις ή πίνακες τιμών

Για τα αέρια καύσιμα, ο συντελεστής ϕ , δίνεται σε πίνακες

Καύσιμο	$\phi = \varepsilon^0 / H_u^0$
Κώκ	1,05
Διάφορα είδη άνθρακα	1,06-1,10
Ξύλο	1,15-1,30
Διάφορα υγρά καύσιμα και πετρέλαιο	1,04-1,08
Φυσικό αέριο	1,04±0,5%
Αέριο υψικαμίνου	0,98±1%
Υδρογόνο	0,985
Μονοξείδιο του άνθρακα	0,973
Θείο (ρομβικό)	2,017

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του ϕ καυσίμων υλών

Για τα υγρά καύσιμα, ο συντελεστής ϕ , δίνεται από την ημιεμπειρική σχέση

$$\phi = 1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} (1 - 2,0628 \frac{h}{c}) \quad (2.22)$$

όπου

c , h , o , s η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα, υδρογόνο, οξυγόνο και θείο αντίστοιχα.

Για τα στερεά καύσιμα, η χημική εξέργεια, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

$$\varepsilon^0 = (H_u^0 + w h_{fg}^0) \phi_\xi + (\varepsilon_s^0 - H_{us}^0) s \quad (2.23)$$

όπου

w , s η περιεκτικότητα του καυσίμου σε υγρασία και θείο αντίστοιχα

h_{fg}^0 η λανθάνουσα θερμότητα του νερού σε θερμοκρασία T^0

ε_s^0 η χημική εξέργεια του θείου σε συνθήκες (P^0 , T^0)

H_{us}^0 η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του θείου σε συνθήκες (P^0 , T^0)

ϕ_ξ ο συντελεστής που προσδιορίζεται από τις ακόλουθες ημιεμπειρικές σχέσεις (αφορά ξηρό καύσιμο)

Εάν $\frac{o}{c} < 0,667$ τότε

$$\phi_\xi = 1,0437 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,0610 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (2.24)$$

όπου

n η κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου σε άζωτο

Εάν $0,667 < \frac{o}{c} < 2,67$ τότε

$$\varphi_{\xi} = \frac{0,7929+0,00615 h/c+0,0383 n/c}{1-0,3035^o/c} \quad (2.25)$$

Η χημική εξέργεια μίγματος τελείων αερίων προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\epsilon}_{0M} = \sum_i x_i \tilde{\epsilon}_{0i} + \tilde{R}T_0 \sum_i x_i \ln(\gamma_i x_i) \quad (2.26)$$

όπου

x_i η κ.ό περιεκτικότητα του συστατικού i

$\tilde{\epsilon}_{0i}$ η χημική εξέργεια του συστατικού i

γ_i ο συντελεστής ενεργότητας του συστατικού i (για ιδανικά διαλύματα $\gamma_i = 1$)

Η χημική εξέργεια μείγματος είναι πάντοτε μικρότερη από το άθροισμα των χημικών εξεργειών των συστατικών του (στην ίδια πίεση και θερμοκρασία).

Η εξέργεια μίγματος καυσίμων τελείων αερίων δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{E}_F = \dot{n}_F \sum_i x_i \tilde{c}_{p_i}^{\epsilon}(T - T_0) + \dot{n}_F \tilde{R}T_0 \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + \dot{n}_F (\sum_i x_i \tilde{\epsilon}_{0i} + \tilde{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i) + \dot{n}_{H_2O} \tilde{R}T_0 \ln\left(\frac{P_{00}}{P_{00}}\right)_{H_2O} \quad (2.27)$$

όπου

\dot{n}_F η παροχή γραμμομορίων του καυσίμου

$\tilde{\epsilon}_{0i}$ η παροχή γραμμομορίων υδρατμών, εάν το καύσιμο περιέχει υδρατμούς

Στην παραπάνω εξίσωση, οι δύο πρώτοι όροι αποτελούν τη φυσική συνιστώσα της εξέργειας, ο τρίτος όρος τη χημική εξέργεια μίγματος και ο τελευταίος όρος οφείλεται στη διαφορά μεταξύ πραγματικής και πρότυπης μερικής πίεσης υδρατμού στον αέρα. Ο όρος αυτός είναι περίπου ίσος με το 1% της χημικής εξέργειας του καυσίμου.

Η εξέργεια καυσαερίου, αποτελούμενο μόνο από σώματα αναφοράς, δίνεται:

$$\dot{E} = \dot{n} \sum_i x_i \tilde{c}_{p_i}^{\epsilon}(T - T_0) + \dot{n} \tilde{R}T_0 \sum_i x_i \ln \frac{x_i P}{(P_{00})_i} \quad (2.28)$$

όπου

\dot{n} η παροχή γραμμομορίων του καυσαερίου

Στην εξίσωση (2.28), ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τη θερμική συνιστώσα, ενώ ο δεύτερος όρος είναι το άθροισμα της μηχανικής συνιστώσας και της χημικής εξέργειας του μίγματος.

Για τον προσδιορισμό της χημικής εξέργειας σε μία πραγματική θερμοκρασία $T_0 \neq T^0$, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\epsilon}_0 = \tilde{\epsilon}^0 \frac{T_0}{T^0} - \Delta \tilde{h}^0 \left(1 - \frac{T_0}{T^0}\right) \quad (2.29)$$

όπου

$\Delta \tilde{h}^0$ η γραμμομοριακή ενθαλπία καύσης του σώματος στις πρότυπες συνθήκες

Για βιομηχανικά καύσιμα συνήθως χρησιμοποιείται η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα:

$$\Delta \tilde{h}^0 = -\tilde{H}_u^0 \quad (2.30)$$

2.2.7 Εξέργεια Θερμικής Ακτινοβολίας [9]

Η εξέργεια ροής της θερμικής ακτινοβολίας μελανού σώματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{\epsilon}_b = \dot{\epsilon}_b - \dot{\epsilon}_0 - T_0(\dot{s}_b - \dot{s}_0) = \sigma T^4 \left[1 - \frac{4T_0}{3T} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T}\right)^4\right] \quad (2.31)$$

Όπου

$\dot{\epsilon}_b$ η πυκνότητα ροής της ενέργειας

$$\dot{\epsilon}_b = \sigma T^4 \quad (2.32)$$

T η θερμοκρασία του σώματος

σ η σταθερά Stefan-Boltzman

$$\sigma = 5,6667 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$$

\dot{s}_b η πυκνότητα ροής της εντροπίας

$$\dot{s}_b = \frac{4}{3} \sigma T^3 = \frac{4}{3} \frac{\dot{\epsilon}_b}{T} \quad (2.33)$$

$\dot{\epsilon}_0$ η πυκνότητα ροής της ενέργειας σε θερμοκρασία T_0

\dot{s}_0 η πυκνότητα ροής της εντροπίας σε θερμοκρασία T_0

2.2.8 Ισολογισμός Εξέργειας [9]

Κάθε ένα σύστημα τροφοδοτείται με μία ροή εξέργειας και παράγει ένα ή περισσότερα χρήσιμα προϊόντα. Καταστρώνοντας το εξεργειακό ισοζύγιο διατυπώνουμε την υποβάθμιση της ενέργειας, ή ισοδύναμα, την ανεπανόρθωτη καταστροφή εξέργειας εξαιτίας του γεγονότος ότι οι πραγματικές διεργασίες είναι μη αντιστρεπτές.

Ο εξεργειακός ισολογισμός του συστήματος γράφεται ως εξής:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_L + \dot{I} \quad (2.34)$$

όπου

\dot{E}_F η εξέργεια στην είσοδο του συστήματος

\dot{E}_P η εξέργεια στην έξοδο του συστήματος

\dot{E}_L η εξεργειακές απώλειες του συστήματος

\dot{I} η εσωτερική αναστρεψιμότητα του συστήματος

Η ολική αναστρεψιμότητα του συστήματος I είναι το άθροισμα των επιμέρους αναστρεψιμοτήτων I_i των επιμέρους συστημάτων i του συνολικού συστήματος. Ισχύει δηλαδή:

$$\dot{I} = \sum_i \dot{I}_i \quad (2.35)$$

Να σημειωθεί ότι, στην παρούσα ανάλυση, το E_L , επειδή έχει μικρή τιμή, αμελείται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Άρα, για τη συνολική αναστρεψιμότητα, ισχύει:

$$I = \sum_i E_{Fi} - \sum_i E_{Pi} \quad (2.36)$$

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης για ένα σύστημα (ή για έναν όγκο ελέγχου), ορίζεται ως:

$$\eta_{ex} = \zeta = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} \quad (2.37)$$

Η τιμή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης είναι μικρότερη από τη μονάδα διότι, με βάση τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο, η αναστρεψιμότητα του συστήματος είναι πάντα θετική.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του εξεργειακού βαθμού απόδοσης ζ και της καταστροφής της εξέργειας I για τα βασικά μέρη των κυκλωμάτων.

Εναλλάκτης

$$I = E_{h1} + E_{c1} - E_{h2} - E_{c2} \quad (2.38)$$

$$\zeta = \frac{E_{c2} - E_{c1}}{E_{h1} - E_{h2}} \quad (2.39)$$

Στρόβιλος

$$I = E_1 - E_2 - P \quad (2.40)$$

$$\zeta = \frac{P}{E_1 - E_2} \quad (2.41)$$

Αντλία

$$I = P - (E_2 - E_1) \quad (2.42)$$

$$\zeta = \frac{E_2 - E_1}{P} \quad (2.43)$$

Σύστημα

$$I = \sum_i I_i \quad (2.44)$$

$$\zeta = \frac{P_{el}}{\sum_i E_{ini}} \quad (2.45)$$

όπου

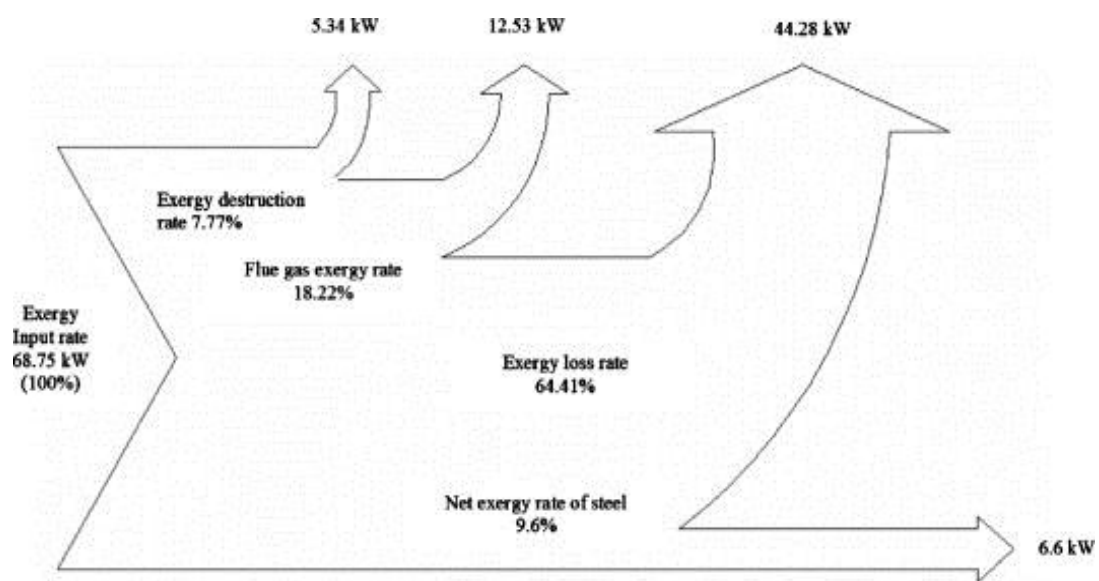
Με δείκτη **1** συμβολίζεται η είσοδος και με δείκτη **2** η έξοδος

Με δείκτη **c** συμβολίζεται το θερμό ρεύμα και με δείκτη **h** το ψυχρό ρεύμα

Με δείκτη **P** συμβολίζεται η ισχύς

2.2.9 Διάγραμμα Grassmann [9]

Το διάγραμμα Grassmann αποτελεί το γραφικό τρόπο παρουσίασης της ροής εξέργειας σε ένα σύστημα.



Σχήμα 2.6 : Παράδειγμα διαγράμματος Grassmann [10]

Κεφάλαιο 3. Μελέτη Σεναρίων

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι πιθανές θερμικές εγκαταστάσεις, οι οποίες μπορούν να παράξουν την επιθυμητή θερμική ισχύ ενός διυλιστηρίου. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ των ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών συμπαραγωγής στα διυλιστήρια της Ελλάδος. Σκοπός της ακόλουθης τεχνοοικονομικής μελέτης είναι η εύρεση της καλύτερης δυνατής επένδυσης.

Οι τεχνολογίες συμπαραγωγής που βρίσκονται σε λειτουργία στην Ελλάδα είναι:

Σενάριο	Τεχνολογία Συμπαραγωγής
A	Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης
B	Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης - Απομάστευσης
Γ	Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας
Δ	Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

Πίνακας 3.1: Τεχνολογίες Συμπαραγωγής

Για όλα τα σενάρια ισχύουν τα εξής:

- **Θερμοκρασία περιβάλλοντος:** 15 °C
- **Πίεση περιβάλλοντος:** 1,0132 bar
- **Pinch Point:** 10°C
- **Πίεση καυσαερίου στην έξοδο της εγκατάστασης:** 1,02bar

Θάλαμος Καύσης Λέβητα
(Σενάρια A, B)

-Πτώση πίεσης: 0 bar
-λ: 1,05
-Πίεση καυσίμου: 2 bar

Θάλαμος Καύσης Αεριοστρόβιλου
(Σενάρια Γ, Δ)

-Πτώση πίεσης: 0,5 bar
-Πίεση καυσίμου: 18 bar
-Θερμοκρασία καυσαερίου σεναρίου Γ: 1050 °C
-Θερμοκρασία καυσαερίου σεναρίου Δ: 850 °C

Θάλαμος Μετάκαυσης (Σενάριο Δ)

-Πτώση πίεσης: 0 bar
-Πίεση καυσίμου: 2 bar
-Παροχή καυσίμου: 0,24 kg/s

Προθερμαντής Υψηλής Πίεσης

-Πτώση πίεσης θερμού ρεύματος:
0,01 bar
- Πτώση πίεσης ψυχρού ρεύματος:
2,08 bar

Ατμοποιητής Υψηλής Πίεσης	-Πτώση πίεσης θερμού ρεύματος: 0,01 bar - Πτώση πίεσης ψυχρού ρεύματος: 2,37 bar
Υπερθερμαντής Υψηλής Πίεσης	-Πτώση πίεσης θερμού ρεύματος: 0,01 bar -Πτώση πίεσης ψυχρού ρεύματος: 1,98 bar
Ατμοποιητής Χαμηλής Πίεσης (Σενάρια Γ, Δ)	-Πτώση πίεσης θερμού ρεύματος: 0,01 bar -Πτώση πίεσης ψυχρού ρεύματος: 2,96 bar
Συμπιεστής (Σενάρια Γ, Δ)	-Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης: 0,82 -Μηχανικός βαθμός απόδοσης: 0,98 -Πίεση αέρα σεναρίου Γ: 12,03 bar -Πίεση αέρα σεναρίου Δ: 12,5 bar
Στρόβιλος	-Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης: 0,86 -Μηχανικός βαθμός απόδοσης: 0,98
Αντλία – Ανεμιστήρας	-Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης: 0,7 -Μηχανικός βαθμός απόδοσης: 0,9
Γεννήτρια	-Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης: 0,99 -Μηχανικός βαθμός απόδοσης: 0,98
Θερμική Κατανάλωση Υψηλής Πίεσης	-Πτώση πίεσης: 16 bar
Θερμική Κατανάλωση Χαμηλής Πίεσης	-Πτώση πίεσης: 0,1 bar
Τύμπανο Υψηλής Πίεσης	-Πτώσεις πιέσεων: 0,1 bar -Μεταβολή θερμοκρασίας ρευμάτων: 0 °C -Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας: 0 kg/s
Τύμπανο Χαμηλής Πίεσης (Σενάρια Γ, Δ)	-Πτώσεις πιέσεων: 0,1 bar -Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας: 0 kg/s

Συμπυκνωτής (Σενάριο Β)	-Υπόψυξη: 0 °C -Πτώση πίεσης θερμού ρεύματος: 0,1 bar -Πτώση πίεσης ψυχρού ρεύματος: 1 bar
Αναμίκτης	-Πτώση πίεσης: 0 bar
Σύσταση Αέρα Περιβάλλοντος	-N ₂ : 0,76 kg/kg -O ₂ : 0,24 kg/kg
Σύσταση Καυσίμου (80% φυσικό αέριο και 20% αέριο διυλιστηρίου)	-C ₂ H ₆ : 0,032 kg/kg -C ₃ H ₈ : 0,002 kg/kg -CH ₄ : 0,966 kg/kg -O ₂ : 0,032 kg/kg
Σύσταση Καυσίμου στο Λέβητα Μετάκαυσης (Σενάριο Δ) (80% φυσικό αέριο και 20% αέριο διυλιστηρίου)	-C ₂ H ₆ : 0,032 kg/kg -C ₃ H ₈ : 0,022 kg/kg -CH ₄ : 0,946 kg/kg -O ₂ : 0,032 kg/kg
Χαρακτηριστικά Εργαζόμενου Μέσου στη Θερμική Κατανάλωση Υψηλής Πίεσης	-Πίεση πριν τη Θερμική Κατανάλωση: 48,5625 bar -Θερμοκρασία πριν τη Θερμική Κατανάλωση: 420 °C -Θερμοκρασία μετά τη Θερμική Κατανάλωση: 237,47 °C -Παροχή Μάζας εργαζόμενου μέσου: 14,4 kg/s
Χαρακτηριστικά Εργαζόμενου Μέσου στη Θερμική Κατανάλωση Χαμηλής Πίεσης	-Πίεση πριν τη Θερμική Κατανάλωση: 3,62 bar -Θερμοκρασία μετά τη Θερμική Κατανάλωση: 139 °C -Παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου: 4,44 kg/s
Χαρακτηριστικά Εργαζόμενου Μέσου στον Συμπυκνωτή (Σενάριο Β)	-Πίεση πριν τον Συμπυκνωτή: 0,2 bar -Παροχή μάζας εργαζόμενου μέσου: 4 kg/s -Πίεση εισόδου νερού ψύξης: 3 bar -Θερμοκρασία εισόδου νερού ψύξης: 15 °C -Θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης: 30 °C
Έτος Κατασκευής	-2016

Τάση παραγόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας

-Διασυνδεδεμένο σύστημα:
150kV (100-200 kV)
-Ιδιοκαταναλώσεις: 6kV (0,45-12 kV)

Ποσοστό Ηλεκτρικής Ενέργειας που καταναλώνεται επί τόπου
Τύπος Θέρμανσης

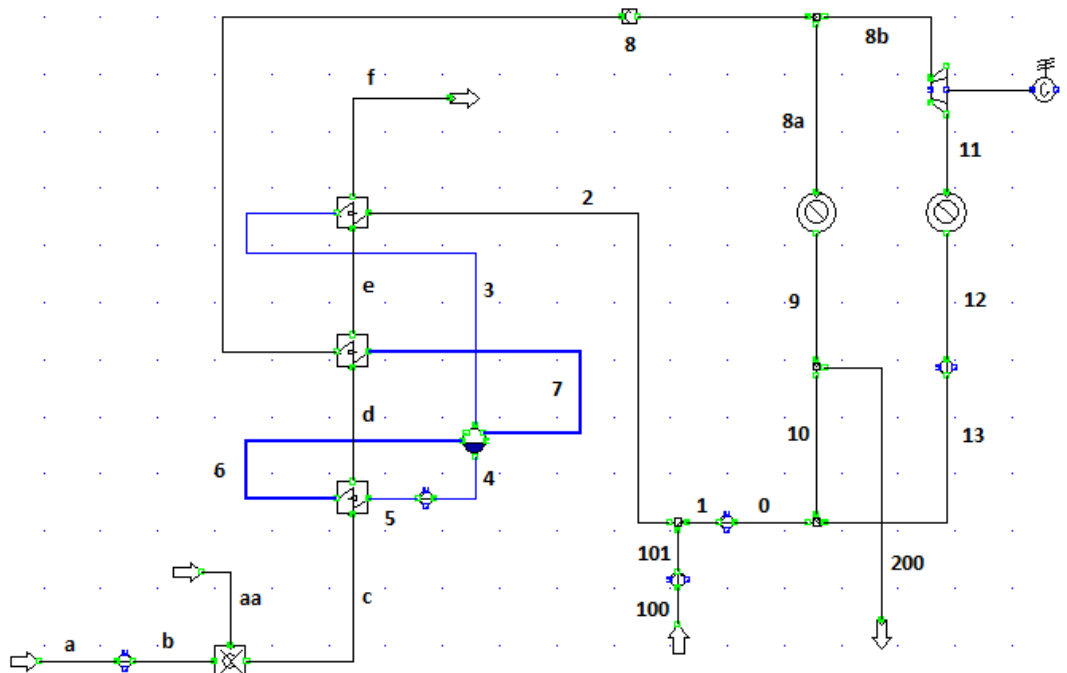
- $P_{e,self-consumption}$: 0%
-Θερμό νερό

Οι εξεταζόμενες τεχνολογίες συμπαραγωγής μοντελοποιήθηκαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα IPSEpro. [11]

Το IPSEpro είναι ένα πρόγραμμα το οποίο προσομοιώνει θερμοδυναμικές διεργασίες και υπολογίζει τα ισοζυγία θερμότητας αυτών. Αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων που σκοπό έχουν τη δημιουργία μοντέλων ενός ευρέως φάσματος εφαρμογών αλλά και για τη χρήση αυτών των μοντέλων για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, τα εργαλεία του IPSEpro χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ισοζυγίων θερμότητας και τον προσδιορισμό των σημείων λειτουργίας μίας εγκατάστασης, για την επαλήθευση και επικύρωση μετρήσεων με τη βοήθεια κατάλληλων δοκιμών καθώς και για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση διεργασιών.

3.1 Σενάριο Συμπαραγωγής A - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



Σχήμα 3.1: Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

Περιγραφή εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αποτελείται από:

- 1 Λέβητα
- 1 Προθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Ατμοποιητή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Υπερθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Ατμοστρόβιλο Αντίθλιψης
- 1 Γεννήτρια
- 2 Θερμικές καταναλώσεις
- 1 Ανεμιστήρα
- 4 Αντλίες
- 1 Τύμπανο
- 2 Διαχωριστές
- 2 Αναμίκτες

Τμήμα Νερού – Ατμού

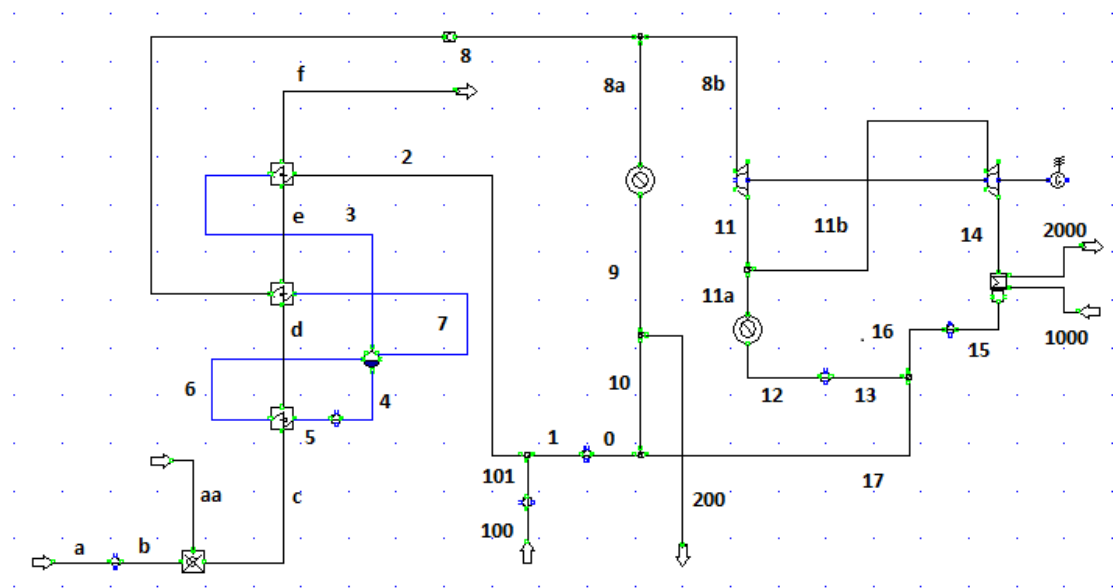
Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) κατάστασης **0** συμπιέζεται με χρήση αντλίας στην κατάσταση **1**. Στη συνέχεια, συμπιεσμένο συμπύκνωμα (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **100** συμπιέζεται στο σημείο **101**) αναμειγνύεται με το εργαζόμενο μέσο οδηγώντας το τελικό μείγμα στο σημείο **2**. Από το σημείο αυτό το νερό προθερμαίνεται στον προθερμαντή, καταλήγοντας έτσι στο σημείο **3**. Έπειτα, το κορεσμένο νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **4** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **5**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **7** και υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή καταλήγοντας στο σημείο **8**. Εκεί, το εργαζόμενο μέσο διαχωρίζεται σε δύο τμήματα (σημεία **8a** και **8b**). Από το σημείο **8a** στέλνεται στο διυλιστήριο για την κάλυψη των θερμικών απαιτήσεων σε ατμό υψηλής πίεσης. Έτσι επιστρέφει στο σημείο **10** με λιγότερη μάζα μάζα (μέρος της μάζας διαφεύγει στις απαραίτητες για τη διύλιση διεργασίες είτε σε απώλειες (σημείο **200**)). Από το σημείο **8b** αποτονώνεται στον στρόβιλο αντίθλιψης για παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, καταλήγοντας στο σημείο **11**. Από εκεί εκμεταλλευόμαστε μέρος της θερμικής του ενέργειας οδηγώντας το έτσι στο σημείο **12** και με χρήση αντλίας στο σημείο **13**. Τέλος, έπειτα από τα σημεία **10**, **13** ακολουθείται ανάμειξη και το εργαζόμενο μέσο καταλήγει στο σημείο **0**.

Τμήμα Καυσίμου – Αέρα – Καυσαερίου

Ο συμπιεσμένος αέρας (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **a** συμπιέζεται στο σημείο **b**) αναμειγνύεται με το καύσιμο (σημείο **aa**) στο θάλαμο καύσης, όπου και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διεργασία της καύσης. Τα καυσαέρια μεταφέρουν θερμότητα μέσω του ατμοποιητή (σημεία **c-d**), του υπερθερμαντή (σημεία **d-e**) και του προθερμαντή (σημεία **e-f**) στο εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (σημείο **f**).

Θεωρήσαμε ότι όλη η εγκατάσταση αποτελεί μονάδα συμπαραγωγής προκειμένου να έχουμε συγκρίσιμα σενάρια. Στην πραγματικότητα, ο θερμικός καταναλωτής υψηλής πίεσης δεν ανήκει στο τμήμα συμπαραγωγής, δεδομένου του ότι μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα. Για το λόγο αυτό δε θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας της μονάδας, τόσο η θερμότητα του καταναλωτή υψηλής πίεσης, όσο και το καύσιμο που αντιστοιχεί στην παραγωγή αυτής της θερμότητας. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων παρατίθεται ο δείκτης PESR και για τις δύο περιπτώσεις.

3.2 Σενάριο Συμπαραγωγής B - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



Σχήμα 3.2: Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

Περιγραφή εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αποτελείται από:

- 1 Λέβητα
- 1 Προθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Ατμοποιητή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Υπερθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Ατμοστρόβιλο Συμπύκνωσης – Απομάστευσης
- 1 Γεννήτρια
- 2 Θερμικές καταναλώσεις
- 1 Συμπυκνωτή
- 1 Φυσητήρα
- 5 Αντλίες
- 1 Τύμπανο
- 3 Διαχωριστές
- 3 Αναμίκτης

Τμήμα Νερού – Ατμού

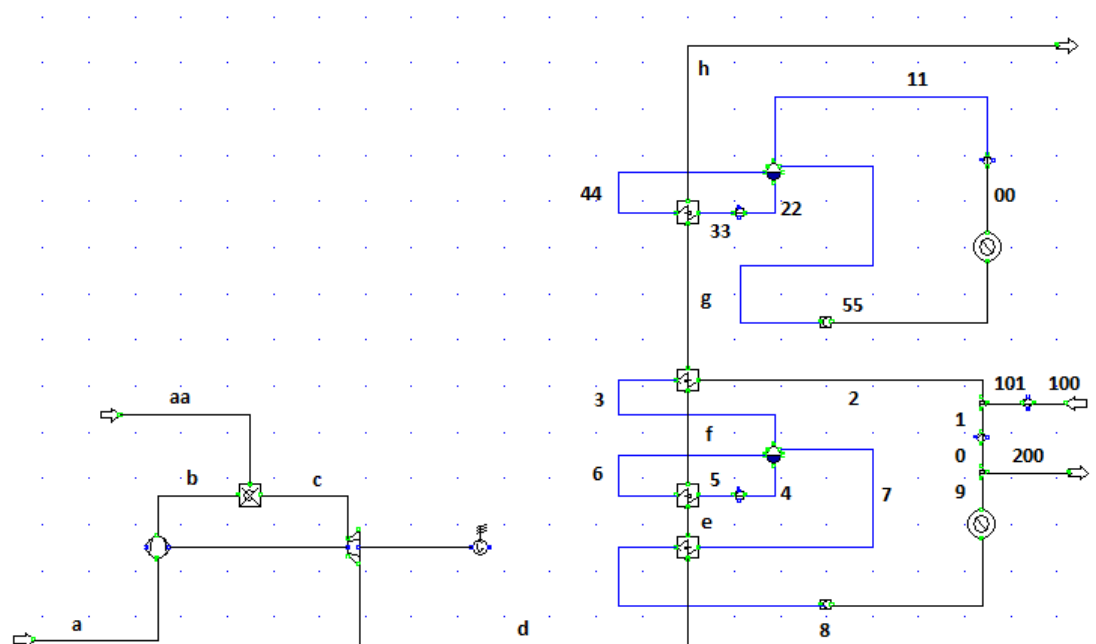
Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) κατάστασης **0** συμπιέζεται με χρήση αντλίας στην κατάσταση **1**. Στη συνέχεια, συμπιεσμένο συμπύκνωμα (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **100** συμπιέζεται στο σημείο **101**) αναμειγνύεται με το εργαζόμενο μέσο οδηγώντας το τελικό μείγμα στο σημείο **2**. Από το σημείο αυτό το νερό προθερμαίνεται στον προθερμαντή, καταλήγοντας έτσι στο σημείο **3**. Έπειτα, το κορεσμένο νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **4** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **5**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **7** και υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή καταλήγοντας στο σημείο **8**. Εκεί, το εργαζόμενο μέσο διαχωρίζεται σε δύο τμήματα (σημεία **8a** και **8b**). Από το σημείο **8a** στέλνεται στο διυλιστήριο με σκοπό την εκμετάλλευση της θερμικής και κινητικής του ενέργειας (κίνηση μηχανικών εξαρτημάτων). Έτσι επιστρέφει στο σημείο **10** με λιγότερη μάζα μάζα μάζα (μέρος της μάζας διαφεύγει στις απαραίτητες για τη διύλιση διεργασίες είτε σε απώλειες (σημείο **200**)). Από το σημείο **8b** αποτονώνεται στον στρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της αποτόνωσης μέχρι την κατάσταση **11**, από όπου ένα μέρος του απομαστεύεται (σημείο **11a**) ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει την αποτόνωση (σημείο **11b**) μέχρι το σημείο **14**. Σε αυτό το σημείο, το εργαζόμενο μέσο διαχωρίζεται σε άλλα δύο ρεύματα (σημεία **11a** και **11b**). Από το σημείο **11a** εκμεταλλευόμαστε μέρος της θερμικής του ενέργειας οδηγώντας το έτσι στο σημείο **12** και με χρήση αντλίας στο σημείο **13**. Το τελευταίο τμήμα του εργαζόμενου μέσου (σημείο **14**), συμπυκνώνεται (σημείο **15**) και στη συνέχεια συμπιέζεται φτάνοντας στο σημείο **16**. Αμέσως μετά τα σημεία **13**, **16** ακολουθεί ανάμειξη και το εργαζόμενο μέσο οδηγείται στο σημείο **17**. Τέλος, έπειτα από τα σημεία **10**, **17** πραγματοποιείται μία ακόμα ανάμειξη και το εργαζόμενο μέσο καταλήγει στο σημείο **0**.

Τμήμα Καυσίμου – Αέρα – Καυσαερίου

Ο συμπιεσμένος αέρας (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **a** συμπιέζεται στο σημείο **b**) αναμειγνύεται με το καύσιμο (σημείο **aa**) στο θάλαμο καύσης, όπου και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διεργασία της καύσης. καυσαέρια μεταφέρουν θερμότητα μέσω του ατμοποιητή (σημεία **c-d**), του υπερθερμαντή (σημεία **d-e**) και του προθερμαντή (σημεία **e-f**) στο εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (σημείο **f**).

Θεωρήσαμε ότι όλη η εγκατάσταση αποτελεί μονάδα συμπαραγωγής προκειμένου να έχουμε συγκρίσιμα σενάρια. Στην πραγματικότητα, ο θερμικός καταναλωτής υψηλής πίεσης δεν ανήκει στο τμήμα συμπαραγωγής, δεδομένου του ότι μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα. Για το λόγο αυτό δε θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας της μονάδας, τόσο η θερμότητα του καταναλωτή υψηλής πίεσης, όσο και το καύσιμο που αντιστοιχεί στην παραγωγή αυτής της θερμότητας. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων παρατίθεται ο δείκτης PESR και για τις δύο περιπτώσεις.

3.3 Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα 3.3: Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

Περιγραφή εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αποτελείται από:

- 1 Αεριοστρόβιλο, τα μέρη του οποίου είναι:
 - ◆ 1 Συμπιεστής
 - ◆ 1 Θάλαμο Καύσης
 - ◆ 1 Στρόβιλος
 - ◆ 1 Γεννήτρια
- 1 Προθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 2 Ατμοποιητές (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Υπερθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 2 Θερμικές καταναλώσεις
- 5 Αντλίες
- 2 Τύμπανα
- 1 Διαχωριστή
- 1 Αναμικτή

Τμήμα Νερού – Ατμού Υψηλής Πίεσης

Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) βρίσκεται στο σημείο **0**. Με χρήση αντλίας συμπιέζεται, φτάνοντας έτσι στο σημείο **1**. Στη συνέχεια, συμπιεσμένο συμπύκνωμα (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **100** συμπιέζεται στο σημείο **101**) αναμειγνύεται με το εργαζόμενο μέσο οδηγώντας το τελικό μείγμα στο σημείο **2**. Από το σημείο αυτό το νερό προθερμαίνεται στον προθερμαντή, καταλήγοντας έτσι στο σημείο **3**. Έπειτα, το κορεσμένο νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **4** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **5**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **7** και υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή καταλήγοντας στο σημείο **8**. Από το σημείο **8** στέλνεται στο διυλιστήριο με σκοπό την εκμετάλλευση της θερμικής και κινητικής του ενέργειας (κίνηση μηχανικών εξαρτημάτων). Έτσι επιστρέφει στο σημείο **0** με λιγότερη μάζα μάζα (μέρος της μάζας διαφεύγει στις απαραίτητες για τη διύλιση διεργασίες είτε σε απώλειες (σημείο **200**)).

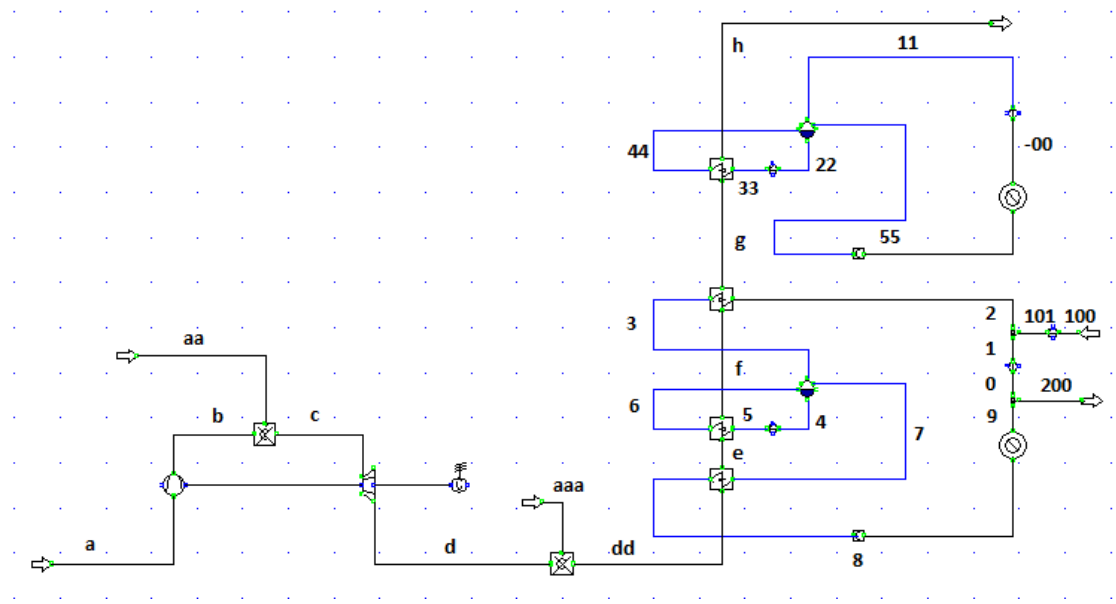
Τμήμα Νερού – Ατμού Χαμηλής Πίεσης

Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) βρίσκεται στο σημείο **00**. Με χρήση αντλίας συμπιέζεται, φτάνοντας έτσι στο σημείο **11**. Από το σημείο αυτό το νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **22** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **33**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **55**. Από το σημείο αυτό εκμεταλλευόμαστε μέρος της θερμικής του ενέργειας οδηγώντας το έτσι στο σημείο **0**.

Τμήμα Καυσίμου – Αέρα – Καυσαερίου

Ο συμπιεσμένος αέρας (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **a** συμπιέζεται στο σημείο **b** με χρήση του συμπιεστή) αναμειγνύεται με το καύσιμο (σημείο **aa**) στο θάλαμο καύσης, όπου και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διεργασία της καύσης. Τα καυσαέρια (σημείο **c**) αποτονώνονται στον στρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του περιστρέφει το ρότορα της γεννήτριας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Έπειτα από την αποτόνωση καταλήγουν στο σημείο **d** και στη συνέχεια μεταφέρουν θερμότητα μέσω του υπερθερμαντή υψηλής πίεσης (σημεία **d–e**), του ατμοποιητή υψηλής πίεσης (σημεία **e–f**), του προθερμαντή υψηλής πίεσης (σημεία **f–g**) και του ατμοποιητή χαμηλής πίεσης (σημεία **g–h**) στο εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (σημείο **h**).

3.4 Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση



Σχήμα 3.4: Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

Περιγραφή εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αποτελείται από:

- 1 Αεριοστρόβιλο, τα μέρη του οποίου είναι:
 - ◆ 1 Συμπιεστής
 - ◆ 1 Θάλαμο Καύσης
 - ◆ 1 Στρόβιλος
 - ◆ 1 Γεννήτρια
- 1 Θάλαμο Μετάκαυσης
- 1 Προθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 2 Ατμοποιητές (εναλλάκτης θερμότητας)
- 1 Υπερθερμαντή (εναλλάκτης θερμότητας)
- 2 Θερμικές καταναλώσεις
- 5 Αντλίες
- 2 Τύμπανα
- 1 Διαχωριστή
- 1 Αναμικτή

Τμήμα Νερού – Ατμού Υψηλής Πίεσης

Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) βρίσκεται στο σημείο **0**. Με χρήση αντλίας συμπιέζεται, φτάνοντας έτσι στο σημείο **1**. Στη συνέχεια, συμπιεσμένο συμπύκνωμα (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **100** συμπιέζεται στο σημείο **101**) αναμειγνύεται με το εργαζόμενο μέσο οδηγώντας το τελικό μείγμα στο σημείο **2**. Από το σημείο αυτό το νερό προθερμαίνεται στον προθερμαντή, καταλήγοντας έτσι στο σημείο **3**. Έπειτα, το κορεσμένο νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **4** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **5**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **7** και υπερθερμαίνεται στον υπερθερμαντή καταλήγοντας στο σημείο **8**. Από το σημείο **8** στέλνεται στο διυλιστήριο με σκοπό την εκμετάλλευση της θερμικής και κινητικής του ενέργειας (κίνηση μηχανικών εξαρτημάτων). Έτσι επιστρέφει στο σημείο **0** με λιγότερη μάζα μάζα (μέρος της μάζας διαφεύγει στις απαραίτητες για τη διύλιση διεργασίες είτε σε απώλειες (σημείο **200**)).

Τμήμα Νερού – Ατμού Χαμηλής Πίεσης

Το εργαζόμενο μέσο (νερό – ατμός) βρίσκεται στο σημείο **00**. Με χρήση αντλίας συμπιέζεται, φτάνοντας έτσι στο σημείο **11**. Από το σημείο αυτό το νερό εισέρχεται στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **22** και στη συνέχεια οδηγείται στον ατμοποιητή (σημείο **33**) με χρήση αντλίας. Αμέσως μετά εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση κορεσμένου ατμού και επιστρέφει στο τύμπανο, από το οποίο και βγαίνει στο σημείο **55**. Από το σημείο αυτό εκμεταλλευόμαστε μέρος της θερμικής του ενέργειας οδηγώντας το έτσι στο σημείο **0**.

Τμήμα Καυσίμου – Αέρα – Καυσαερίου

Ο συμπιεσμένος αέρας (από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες του σημείου **a** συμπιέζεται στο σημείο **b** με χρήση του συμπιεστή) αναμειγνύεται με το καύσιμο (σημείο **aa**) στο θάλαμο καύσης, όπου και στη συνέχεια πραγματοποιείται η διεργασία της καύσης. Τα καυσαέρια (σημείο **c**) αποτονώνονται στον στρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του περιστρέφει το ρότορα της γεννήτριας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Έπειτα από την αποτόνωση καταλήγουν στο σημείο **d** όπου, με επιπλέον καύσιμο πραγματοποιείται μετάκαυση, φτάνοντας έτσι στο σημείο **dd**. Στη συνέχεια, τα τελικά καυσαέρια μεταφέρουν θερμότητα μέσω του υπερθερμαντή υψηλής πίεσης (σημεία **d–e**), του ατμοποιητή υψηλής πίεσης (σημεία **e–f**), του προθερμαντή υψηλής πίεσης (σημεία **f–g**) και του ατμοποιητή χαμηλής πίεσης (σημεία **g–h**) στο εργαζόμενο μέσο και στη συνέχεια αποβάλλονται στην ατμόσφαιρα (σημείο **h**).

Θεωρήσαμε ότι όλη η εγκατάσταση αποτελεί μονάδα συμπαραγωγής προκειμένου να έχουμε συγκρίσιμα σενάρια. Στην πραγματικότητα, η επιπλέον καύση δε λογίζεται στο τμήμα συμπαραγωγής. Για το λόγο αυτό δε θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη στην αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας της μονάδας, τόσο το επιπλέον καύσιμο, όσο και η θερμότητα που παράγεται από αυτό. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων παρατίθεται ο δείκτης PESR και για τις δύο περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας των μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υπολογισμοί αξιολόγησης της ενεργειακής αποδοτικότητας των εξεταζόμενων μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Οι σταθμοί αυτοί εξασφαλίζουν την απαραίτητη χρήσιμη θερμική ισχύ προς το διυλιστήριο καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους.

Ο υπολογισμός για το αν οι μονάδες είναι ΣΗΘΥΑ ή όχι γίνεται με δύο τρόπους:

1. Με επιστροφή συμπυκνώματος, δηλαδή ως ωφέλιμη θερμότητα λογίζεται η θερμότητα του παραγόμενου ατμού μείον τη θερμότητα του συμπυκνώματος που επιστρέφει στο κύκλωμα.
2. Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος, δηλαδή ως ωφέλιμη θερμότητα λογίζεται η θερμότητα του παραγόμενου ατμού χωρίς την αφαίρεση της θερμότητας του συμπυκνώματος που επιστρέφει στο κύκλωμα.

Μέχρι σήμερα οι υπολογισμοί για μονάδες ΣΗΘΥΑ γίνονταν με την πρώτη μεθοδολογία. Δεδομένου του ότι επίκειται αλλαγή στη νομοθεσία, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει ο υπολογισμός και με τους δύο τρόπους.

Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου της κάθε εγκατάστασης βασίζονται στην ενεργειακή μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούνται:

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, P_e [MW]
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, H_{CHP} [MW]
3. Ισχύς Καυσίμου, F_c [MW]
4. Καθορισμός εναρμονισμένων τιμών αναφοράς των βαθμών απόδοσης, η_{er} & η_{hr}

Τα αέρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους εξεταζόμενους σταθμούς θεωρείται ότι έχουν πρακτικά την ίδια θερμογόνο ικανότητα. Επομένως η αναλογία του κάθε αερίου καυσίμου είναι η συνεισφορά του στο ενεργειακό περιεχόμενο του τελικού μείγματος. Με βάση τα ποσοστά των καυσίμων υπολογίζονται οι εναρμονισμένοι βαθμοί απόδοσης για τη μεικτή καύση των δύο αέριων καυσίμων.

Πιο συγκεκριμένα ο εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή ισχύος, η_{er} , εξαρτάται από:

- Είδος καυσίμου
- Έτος κατασκευής μονάδας
- Μέση ετήσια θερμοκρασία – Κλιματική ζώνη

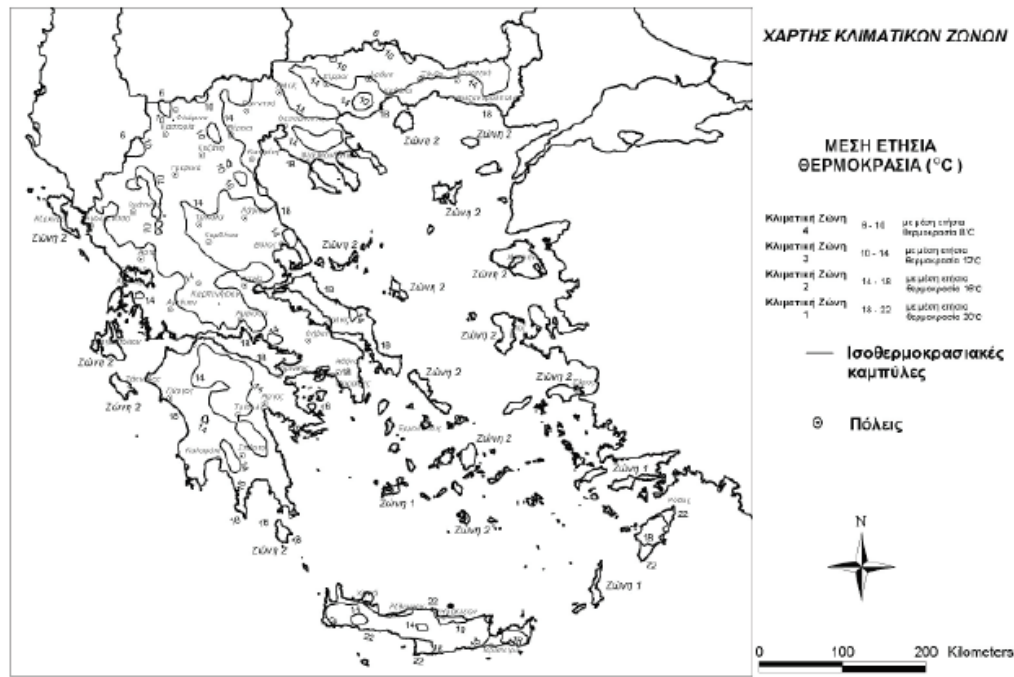
- Τάση παραγόμενης ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα και για τις ιδιοκαταναλώσεις

Λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και του έτους κατασκευής της μονάδας, προκύπτει η ακόλουθη τιμή του εναρμονισμένου βαθμού ηλεκτρικής απόδοσης, $\eta_{e,part}$ (βλ. Σχήμα 4.1), τόσο για φυσικό αέριο όσο και για αέριο διυλιστηρίου, με βάση το παράρτημα Ι του κατ' εξουσιοδότηση κανονισμού (ΕΕ) 2015/2402 της επιτροπής της 12ης Οκτωβρίου 2015:

Κατηγορία	Τύπος καυσίμου	Έτος κατασκευής			
		Πριν το 2012	2012-2015	Από το 2016	
Στερεά	S1	Λιθάνθρακας συμπεριλαμβανομένου του ανθρακίτη, σφραλτούχος άνθρακας, υποσφραλτούχος άνθρακας, οιπτόνθρακας, ημοιοπτόνθρακας, οιπτόνθρακας από πετρέλαιο	44,2	44,2	44,2
	S2	Λιγνίτης, μπρικέτες λιγνίτη, σχιστολιθικό πετρέλαιο	41,8	41,8	41,8
	S3	Τύρφη, μπρικέτες τύρφης	39,0	39,0	39,0
	S4	Ξηρή βιομάζα στην οποία συγκαταλέγονται το ξύλο και άλλη στερεά βιομάζα, συμπεριλαμβανομένων υβόλων (πέλεκτ) και πλίνθων (μπρικετών) ξύλου, ξηρών ξυλοτεμαγίων, καθαρών και ξηρών υπολειμμάτων κατεργασίας ξύλου, κελυφών καρπών και ελαιοπυρήνων και άλλων πυρήνων	33,0	33,0	37,0
	S5	Άλλη στερεά βιομάζα συμπεριλαμβανομένων παντός είδους ξύλου που δεν περιλαμβάνεται στην κατηγορία S4, καθώς και μαύρης αλιούδας και καφέ αλιούδας	25,0	25,0	30,0
	S6	Αστικά και βιομηχανικά (μη ανανεώσιμα) απόβλητα και ανανεώσιμα/βιοσποικοδομήσιμα απόβλητα	25,0	25,0	25,0
Υγρά	L7	Βαρύ μαζούτ, πετρέλαιο εσωτερικής καύσης/ντιζέλ, άλλα προϊόντα πετρελαίου	44,2	44,2	44,2
	L8	Βιούργα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται η βιομεθανόλη, η βιοαιθανόλη, η βιοβουτανόλη, το βιοντίζελ και άλλα βιούργα	44,2	44,2	44,2
	L9	Υγρά απόβλητα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα βιοσποικοδομήσιμα και τα μη ανανεώσιμα απόβλητα (στα οποία περιλαμβάνονται στέατα, λίπη και χρησιμοποιημένα σπέρματα)	25,0	25,0	29,0
Αέρια	G10	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο	52,5	52,5	53,0
	G11	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης	44,2	44,2	44,2
	G12	Βιοαέριο που παράγεται από αναερόβια ζύμωση, υγειονομική ταφή και επεξεργασία λυμάτων	42,0	42,0	42,0
	G13	Αέριο εγκαταστάσεων οιπτόνθρακοποίησης, το αέριο υψικαμίνων και αέριο, φυσικό αέριο, άλλα αέρια ανάκτησης (ήλην του αερίου διύλισης)	35,0	35,0	35,0
Άλλα	O14	Απορριπτόμενη θερμότητα (συμπεριλαμβανομένων των καυσαερίων από διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών, των προϊόντων εξώθερμων χημικών αντιδράσεων)			30,0
	O15	Πυρηνική ενέργεια			33,0
	O16	Ηλιοθερμική ενέργεια			30,0
	O17	Γεωθερμική ενέργεια			19,5
	O18	Άλλα καύσιμα που δεν αναφέρονται ανωτέρω			30,0

Σχήμα 4.1: Επίδραση τύπου καυσίμου και έτος κατασκευής μονάδας στο η_{er} [12]

Η περιοχή της εγκατάστασης ανήκει στην κλιματική ζώνη 2 με μέση ετήσια θερμοκρασία 18°C (βλ. Σχήμα 4.2). Επομένως από το βαθμό απόδοσης που υπολογίστηκε παραπάνω, $\eta_{e,part}$, θα πρέπει να αφαιρεθεί ένα ποσοστό 0,3%.



Σχήμα 4.2: Κλιματικές ζώνες στην Ελλάδα [13]

Όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εγχέεται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο στην Υψηλή τάση των 150 kV. Επομένως από το παράρτημα IV του κανονισμού, μπορεί να υπολογιστεί η επίδραση της παραγόμενης τάσης (βλ. Σχήμα 4.3) που εκφράζεται μέσω του συντελεστή $\eta_{\text{loss,parIV}}$:

$$\eta_{\text{loss,parIV}} = 80\% \times 0,963 + 0\% \times 0,891 = 96,3\%$$

Επίπεδο τάσης σύνδεσης	Διορθωτικός συντελεστής (επίς των εγκαταστάσεων)	Συντελεστής διόρθωσης (επίς των εγκαταστάσεων)
≥ 345 kV	1	0,976
≥ 200 — < 345 kV	0,972	0,963
≥ 100 — < 200 kV	0,963	0,951
≥ 50 — < 100 kV	0,952	0,936
≥ 12 — < 50 kV	0,935	0,914
$\geq 0,45$ — < 12 kV	0,918	0,891
< 0,45 kV	0,888	0,851

Σχήμα 4.3: Επίδραση απωλειών παραγόμενης τάσης στο η_{er} [12]

Έτσι ο εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή με καύσιμο φυσικό αέριο προκύπτει:

$$\eta_{er, \Phi A} = (0,53 - 0,003) \times \eta_{\text{loss,parIV}} = 0,508$$

ενώ για καύσιμο αέριο διωλιστηρίου:

$$\eta_{er, \Delta \Delta} = (0,442 - 0,003) \times \eta_{\text{loss,parIV}} = 0,423$$

Ο τελικός εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης αφού λάβουμε υπόψη τα ποσοστά χρήσης κάθε καυσίμου στο τελικό μείγμα είναι:

$$\eta_{er} = 80\% \times \eta_{er,\Phi A} + 20\% \times \eta_{er,A\Delta} = 0,491$$

Ο εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, η_{hr} , εξαρτάται από:

- Είδος καυσίμου
- Χρήση θέρμανσης

Στην περίπτωση που έχουμε παραγωγή ατμού / θερμού νερού με 100% επιστροφή συμπυκνωμάτων, τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη επιπλέον μείωση στο θερμικό βαθμό απόδοσης ίση με 5%. Στην περίπτωση 1 θεωρείται ότι το ποσοστό επιστροφής των συμπυκνωμάτων είναι της τάξης του 61,8% της συνολικής ατμοπαραγωγής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει ανάλογη μείωση στον η_{hr} . Στην περίπτωση 2 δεν έχουμε επιστροφή συμπυκνωμάτων.

Από το παράρτημα II του κανονισμού μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης η_{hr} (βλ. Σχήμα 4.4) ως εξής:

Περίπτωση 1

$$\eta_{hr,\Phi A} = \chi \frac{100 - 61,8}{100} + (\chi - 5) \frac{61,8}{100}$$

$\eta_{hr,\Phi A} = 0,839$ για φυσικό αέριο

$$\eta_{hr,A\Delta} = \chi \frac{100 - 61,8}{100} + (\chi - 5) \frac{61,8}{100}$$

$\eta_{hr,A\Delta} = 0,819$ για αέριο διυλιστηρίου

Ο τελικός εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος προκύπτει ίσος με:

$$\eta_{hr} = 80\% \times \eta_{hr,\Phi A} + 20\% \times \eta_{hr,A\Delta} = 0,835$$

Περίπτωση 2

$\eta_{hr,\Phi A} = 0,87$ για φυσικό αέριο

$\eta_{hr,A\Delta} = 0,85$ για αέριο διυλιστηρίου

Ο τελικός εναρμονισμένος βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος προκύπτει ίσος με:

$$\eta_{hr} = 80\% \times \eta_{hr,\Phi A} + 20\% \times \eta_{hr,A\Delta} = 0,866$$

Κατηγορία	Τύπος καυσίμου:	Έτος κατασκευής						
		Πριν από το 2016			Από το 2016			
		Θερμό νερό	Ατμός (*)	Απευθείας χρήση καυσαερίων (**)	Θερμό νερό	Ατμός (*)	Απευθείας χρήση καυσαερίων (**)	
Στερεά	S1	Λιθάνθρακας συμπεριλαμβανομένου του ανθρακίτη, ασφαλτούχος άνθρακας, υποασφαλτούχος άνθρακας, οπτάνθρακας, ημι-οπτάνθρακας, οπτάνθρακας από πετρέλαιο	88	83	80	88	83	80
	S2	Λιγνίτης, μπρικέτες λιγνίτη, σχιστολιθικό πετρέλαιο	86	81	78	86	81	78
	S3	Τύρφη, μπρικέτες τύρφης	86	81	78	86	81	78
	S4	Ξηρή βιομάζα στην οποία συγκαταλέγονται το ξύλο και άλλη στερεά βιομάζα, συμπεριλαμβανομένων σβόλων (πέλετ) και πλίνθων (μπρικετών) ξύλου, ξηρών ξυλοτεμαχίων, καθαρών και ξηρών υπολειμμάτων κατεργασίας ξύλου, κελυφών καρπών και ελαιοπυρήνων και άλλων πυρήνων	86	81	78	86	81	78
	S5	Άλλη στερεά βιομάζα συμπεριλαμβανομένων παντός είδους ξύλου που δεν περιλαμβάνεται στην κατηγορία S4, καθώς και μαύρης αλοΐβας και καφέ αλοΐβας.	80	75	72	80	75	72
	S6	Αστικά και βιομηχανικά (μη ανανεώσιμα) απόβλητα και ανανεώσιμα/βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα	80	75	72	80	75	72
Υγρά	L7	Βαρύ μαϊζούτ, πετρέλαιο εσωτερικής καύσης/ντίζελ, άλλα προϊόντα πετρελαίου	89	84	81	85	80	77
	L8	Βιοϋγρά, στα οποία συμπεριλαμβάνονται η βιομεθανόλη, η βιοαιθανόλη, η βιοβουτανόλη, το βιοντίζελ και άλλα βιοϋγρά	89	84	81	85	80	77
	L9	Υγρά απόβλητα, στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα βιοαποικοδομήσιμα και τα μη ανανεώσιμα απόβλητα (στα οποία περιλαμβάνονται στέατα, λίπη και χρησιμοποιημένα σπέρματα)	80	75	72	75	70	67
Αέρια	G10	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο	90	85	82	92	87	84
	G11	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης	89	84	81	90	85	82
	G12	Βιοαέριο που παράγεται από αναερόβια ζύμωση, υγειονομική ταφή και επεξεργασία λυμάτων	70	65	62	80	75	72
	G13	Αέριο εγκαταστάσεων οπτανθρακοποίησης, το αέριο υψικαμίνων και αέριο, φυσικό αέριο, άλλα αέρια ανάκτησης (πλην του αερίου διύλισης)	80	75	72	80	75	72

Σχήμα 4.4: Επίδραση τύπου καυσίμου και χρήσης θέρμανσης στο η_{hr} [12]

Σκοπός της ανάλυσης

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης ήταν ο υπολογισμός του λόγου PESR της μονάδας ΣΗΘ σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΦΕΚ Αριθμ. Φύλλου 1420, 15 Ιουλίου 2009.

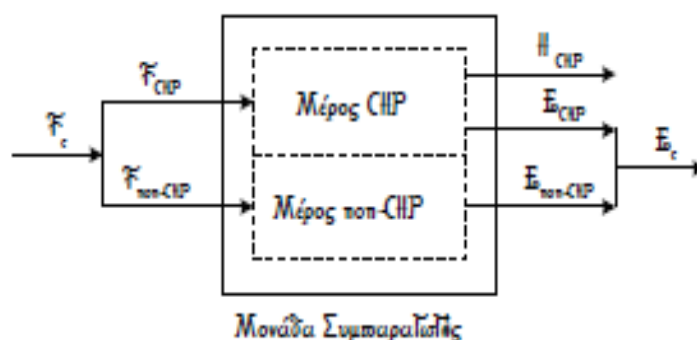
Αξιολόγηση PESR

Έχοντας υπολογίσει τους βαθμούς απόδοσης της συμπαραγωγής η_h και η_e καθώς και τους βαθμούς απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος η_{hr} και η_{er} μπορεί να προσδιοριστεί ο λόγος εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας από τη σχέση:

$$PESR = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_e}{\eta_{er}} + \frac{\eta_h}{\eta_{hr}}} \quad (4.1)$$

Η μονάδα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ όταν $PESR > 10\%$.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ Αριθμ. Φύλλου 1420, 15 Ιουλίου 2009, ορίζεται για κάθε τύπο μονάδας ΣΗΘ ένα κατώφλι για τον ολικό βαθμό απόδοσης, πάνω από τον οποίο η μονάδα συμπαραγωγής παράγει τη μέγιστη τεχνικά χρήσιμη θερμότητα. Στην περίπτωση που ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από το αντίστοιχο κατώφλι, η μονάδα δε βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής και μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται χωρίς ταυτόχρονη παραγωγή χρήσιμης θερμότητας. Τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η μονάδα αποτελείται από δύο μέρη, το συμπαραγωγικό (Μέρος CHP) και το μη συμπαραγωγικό (Μέρος non-CHP) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.5: Χωρισμός μονάδας συμπαραγωγής σε συμπαραγωγικό και μη συμπαραγωγικό μέρος [13]

Η αξιολόγηση της παραπάνω μονάδας μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό του PESR του συμπαραγωγικού μόνου μέρους, δηλαδή του $PESR_{CHP}$. Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού γίνονται οι ακόλουθες πράξεις:

- Στις εξεταζόμενες μονάδες δεν υπάρχει κάποια αύξηση στην ηλεκτρική ισχύ αν λειτουργεί καθαρά ηλεκτροπαραγωγικά. Ισχύει δηλαδή $E_{max}=E_c$ και επομένως ο συντελεστής απώλειας ηλεκτρικής ισχύος είναι $\beta=0$.
- Ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα είναι:

$$C = \frac{\eta_e}{\eta_{CHP}-\eta_e} \quad (4.2)$$

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το συμπαραγωγικό μέρος είναι:

$$E_{CHP} = C \times H_{CHP} \quad (4.3)$$

- Η ενέργεια του καυσίμου του συμπαραγωγικού μέρους προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$F_{CHP} = \frac{E_{CHP}+H_{CHP}}{\eta_{CHP}} \quad (4.4)$$

- Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συμπαραγωγικού μέρους υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\eta_{e,CHP} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}} \quad (4.5)$$

ενώ ο θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{h,CHP} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}} \quad (4.6)$$

- Τελικά, ο λόγος $PESR_{CHP}$ ισούται με:

$$PESR_{CHP} = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{e,CHP}}{\eta_{er}} + \frac{\eta_{h,CHP}}{\eta_{hr}}} \quad (4.7)$$

Το συμπαραγωγικό μέρος της μονάδας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ όταν $PESR_{CHP}>10\%$.

Αυτό είναι επίσης σύμφωνο με το άρθρο 7, παράγραφος 1, του νόμου 3734 του 2009, σύμφωνα με το οποίο: 'Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από σταθμό ή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ΣΗΘΥΑ, νοείται η ενέργεια, η οποία παράγεται με συμπαραγωγή υψηλής αποδοτικότητας. Η ποσότητα της ενέργειας αυτής μπορεί να είναι τμήμα του συνόλου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας του σταθμού'.

Κεφάλαιο 5. Οικονομική Ανάλυση

Για την οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες με πιο συνηθισμένους την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV-ΚΠΑ), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR-EBA) και την περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης. [14] , [15]

Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) μίας επένδυσης είναι η αξία αυτής ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας και δίνεται από τη σχέση:

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+r)^t} + \frac{YA_N}{(1+r)^N} \quad (5.1)$$

όπου,

- K_0 το κόστος της επένδυσης
- KTP_t η Καθαρή Ταμειακή Ροή του έτους t , που ισούται με τη διαφορά των ταμειακών εισροών-εκροών
- r το επιτόκιο αναγωγής
- N η διάρκεια της επένδυσης σε έτη,
- YA_N η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο N -οστό έτος

Η επένδυση κρίνεται οικονομικά βιώσιμη όταν η ΚΠΑ είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Αυτό όμως δε σημαίνει πως μια ΚΠΑ μηδενική καθιστά την επένδυση μη υλοποιήσιμη καθώς υπάρχουν και άλλα κριτήρια τα οποία μπορεί να επιβάλλουν την υλοποίηση της επένδυσης.

Η μέθοδος της ΚΠΑ ενδείκνυται για την μελέτη περιπτώσεων έως και πέντε ετών. Για την συγκεκριμένη εργασία, ο χρονικός ορίζοντας των είκοσι χρόνων της επένδυσης σημαίνει ότι για την επιχείρηση είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθούν οικονομίες ή αντιοικονομίες κλίμακας, οι οποίες θα επηρεάσουν τα έσοδα και τα λειτουργικά κόστη. Για λόγους απλούστευσης, θεωρούμε ότι δεν αναπτύσσονται οικονομίες/αντιοικονομίες κλίμακας.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης IRR

Ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return – Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης) είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής, που κάνει την NPV της επένδυσης, για τη διάρκεια της οικονομικής αξιολόγησης, ίση με το μηδέν. Ειδικότερα, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της. Συνεπώς, ο IRR της επένδυσης προσδιορίζεται από τη λύση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$-K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad (5.2)$$

Η επένδυση κρίνεται οικονομικά βιώσιμη όταν ο δείκτης IRR είναι μεγαλύτερος του επιτοκίου αναγωγής.

Απλή Περίοδος Αποπληρωμής SPP

Ορίζεται ως ο λόγος του Συνολικού Κόστους Επένδυσης προς την ετήσια Καθαρή Ταμειακή Ροή και δίνεται από τη σχέση:

$$SPP = \frac{K_0}{KTP_t} \quad (5.3)$$

Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής DPP

Ορίζεται ως η χρονιά για την οποία η Καθαρή Παρούσα γίνεται ίση με μηδέν και δίνεται από τη σχέση:

$$-K_0 + \sum_{t=1}^{DPP} \frac{KTP_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (5.4)$$

Κόστος Παραγώμενης Ενέργειας EPC

Δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$EPC \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = \frac{R * K_0 + KK + KΣΛ}{HE} \quad (5.5)$$

όπου,

- R ο Συντελεστής Αναγωγής (ετήσια επιβάρυνση του αρχικού κεφαλαίου)

$$R = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad (5.6)$$

- KK το Κόστος Καυσίμου
- KΣΛ το Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας
- HE η παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια

Τοκοχρεολύσιο

Τοκοχρεολύσιο ονομάζουμε τη σταθερή δόση που δίνεται κάθε έτος και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E = \Pi * \frac{r * (1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \quad (5.7)$$

όπου,

- E το τοκοχρεολύσιο
- Π το ποσό του δανείου
- r το επιτόκιο δανεισμού
- N τα έτη αποπληρωμής του δανείου

Χρεολύσιο

Χρεολύσιο είναι το ποσό που πηγαίνει για την απόσβεση του κεφαλαίου.

Για την οικονομική ανάλυση των εξεταζόμενων συστημάτων επεξεργαζόμαστε τα εξής δεδομένα:

Εγκατεστημένη Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς για τα συστήματα συμπαραγωγής
Εγκατεστημένη Θερμική Ισχύς [MW]	Η παραγόμενη θερμική ισχύς για τα συστήματα συμπαραγωγής
Ώρες λειτουργίας [hr]	Η ετήσιες ώρες λειτουργίας της κάθε εγκατάστασης
Κόστος Επένδυσης [€/kW]	Το κόστος εγκατάστασης της κάθε μονάδας
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€/kW]	Το κόστος εγκατάστασης του λέβητα στα συστήματα συμπαραγωγής με χρήση ατμοστρόβιλου
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€/kW]	Λαμβάνεται ως το 20% του Κόστους Επένδυσης
Τιμή Αγοράς Φυσικού Αερίου [€/MWh]	Η τιμή του Φυσικού Αερίου λήφθηκε από διαθέσιμα στοιχεία της προηγούμενης χρονικής περιόδου
Μέσο Κόστος CO₂ [€/MWh]	$\text{Μέσο Κόστος CO}_2 \left[\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right] = \text{Μέση Τιμή Δικαιωμάτων CO}_2 \left[\frac{\text{€}}{\text{tn}} \right] * \eta_e \quad (5.8)$

-Μέση Τιμή Δικαιωμάτων CO₂ [€/tn]: Η ανά μήνα μέση τιμή των δικαιωμάτων CO₂ [16]

Φόρος [%]	Ο φορολογικός συντελεστής είναι 20% για τις επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ
Ρυθμός Απόσβεσης [%]	Στην παρούσα οικονομική ανάλυση λαμβάνεται ίσος με 5%
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	Στην παρούσα οικονομική ανάλυση λαμβάνεται ίσο με 8%
Τιμή Πώλησης [€/MWh] [17]	<p>Σύμφωνα με το Νόμο 4254</p> <p>-Λαμβάνουμε τις τυποποιημένες τιμές του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_e), του ολικού βαθμού απόδοσης (η), καθώς και της τιμής αναφοράς του θερμικού βαθμού απόδοσης (η_{hr})</p> <p>-Λαμβάνουμε την ανά μήνα μέση μοναδιαία τιμή πώλησης Φυσικού Αερίου στους χρήστες ΦΑ στην Ελλάδα οι οποίοι είναι πελάτες ηλεκτροπαραγωγής (ΜΤΦΑη [€/MWh])</p> <p>-Υπολογίζουμε την Προσαρμογή Τιμής Φυσικού Αερίου (ΠΤ), η οποία καλύπτει τις μεταβολές του κόστους του ΦΑ</p> $ΠΤ = (ΜΤΦΑη - 26) * \frac{1 - \frac{(\eta - \eta_e)}{\eta_{hr}}}{\eta_e} \quad (5.9)$ <p>-Υπολογίζουμε τα Έσοδα Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας Χωρίς Ενίσχυση (ΧΕ). Η υλοποίηση της επένδυσης πραγματοποιήθηκε χωρίς τη χρήση δημόσιας ενίσχυσης</p>
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€]	Πρόκειται για το οικονομικό κέρδος που θα είχαμε αν πουλούσαμε την παραγόμενη θερμική ενέργεια
Επίτοκιο Προεξόφλησης [%]	Στην παρούσα οικονομική ανάλυση λαμβάνεται ίσο με 10%
Υπολειμματική Αξία [%κόστους επένδυσης]	Πρόκειται για την αξία που έχει η εγκατάσταση έπειτα από το πέρας του χρονικού οριζοντα αξιολόγησης
Ιδία Κεφάλαια [%]	Το ποσοστό της συνολικής επένδυσης που καλείται να καλύψει ο ιδιώτης

Επιχορήγηση [%] Το ποσοστό της συνολικής επένδυσης που καλύπτεται από το κράτος

Χρόνος Αποπληρωμής Ο χρονικός ορίζοντας για την αξιολόγηση της επένδυσης, ο οποίος ισούται με τη διάρκεια του συμβολαίου που συνάπτεται

Στη συνέχεια κατασκευάζουμε ένα πίνακα αποτελεσμάτων χρήσης. Διαδοχικά έχουμε:

- Έσοδα
- Λειτουργικά Κόστη
- Τόκοι
- Υποτίμηση
 - Ισούται με το Συνολικό Κόστος Επένδυσης επί το Ρυθμό Απόσβεσης
- Κέρδη προ Φόρου
 - Ισούνται με τα Έσοδα μείον τα Έξοδα, δηλαδή τα Λειτουργικά Κόστη, τους Τόκους και την Υποτίμηση
- Καθαρά Κέρδη
 - Ισούνται με τα Κέρδη προ Φόρου μείον το Φόρο
- Χρεολύσιο Δανείου
- Καθαρή Ταμειακή Ροή
 - Ισούται με την Υποτίμηση και τα Καθαρά Κέρδη μείον το Χρεολύσιο Δανείου

Όσον αφορά την αποπληρωμή του Δανείου, ακολουθείται η μέθοδος του σταθερού χρεολυσίου.

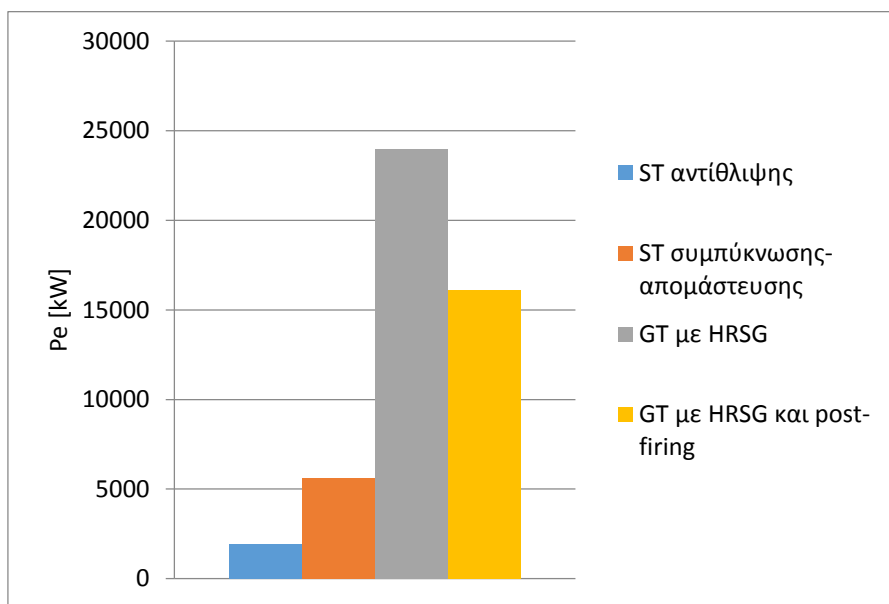
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

6.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση

6.1.1 Ηλεκτρική Ενέργεια

6.1.1.1 Ηλεκτρική Ισχύς

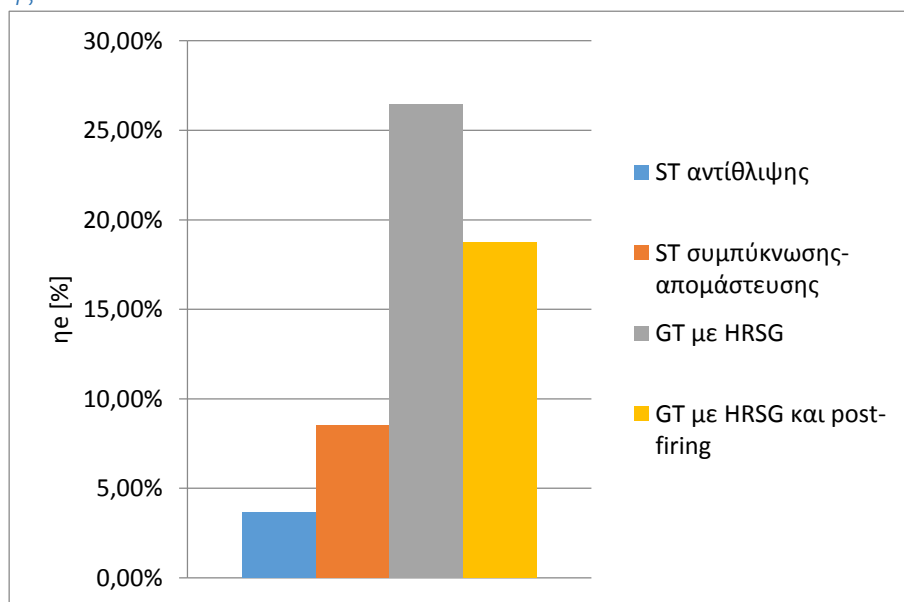
Ηλεκτρική Ισχύς	
	P_e [kW]
ST αντίθλιψης	1942,2
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	5596,1
GT με HRSG	23970
GT με HRSG και post-firing	16087



Σχήμα 6.1: Ηλεκτρική Ισχύς

6.1.1.2 Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης

Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης	
	η_e [%]
ST αντίθλιψης	3,64
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	8,50
GT με HRSG	26,43
GT με HRSG και post-firing	18,74

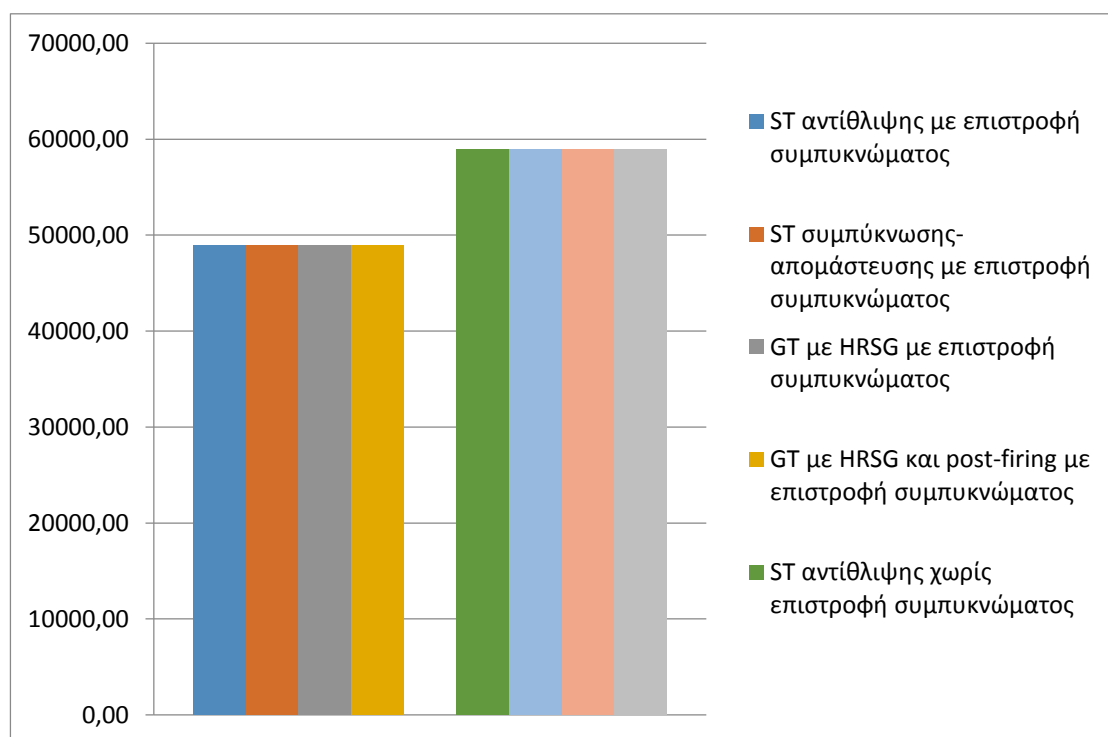


Σχήμα 6.2: Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης

6.1.2 Θερμική Ενέργεια

6.1.2.1 Θερμική Ισχύς

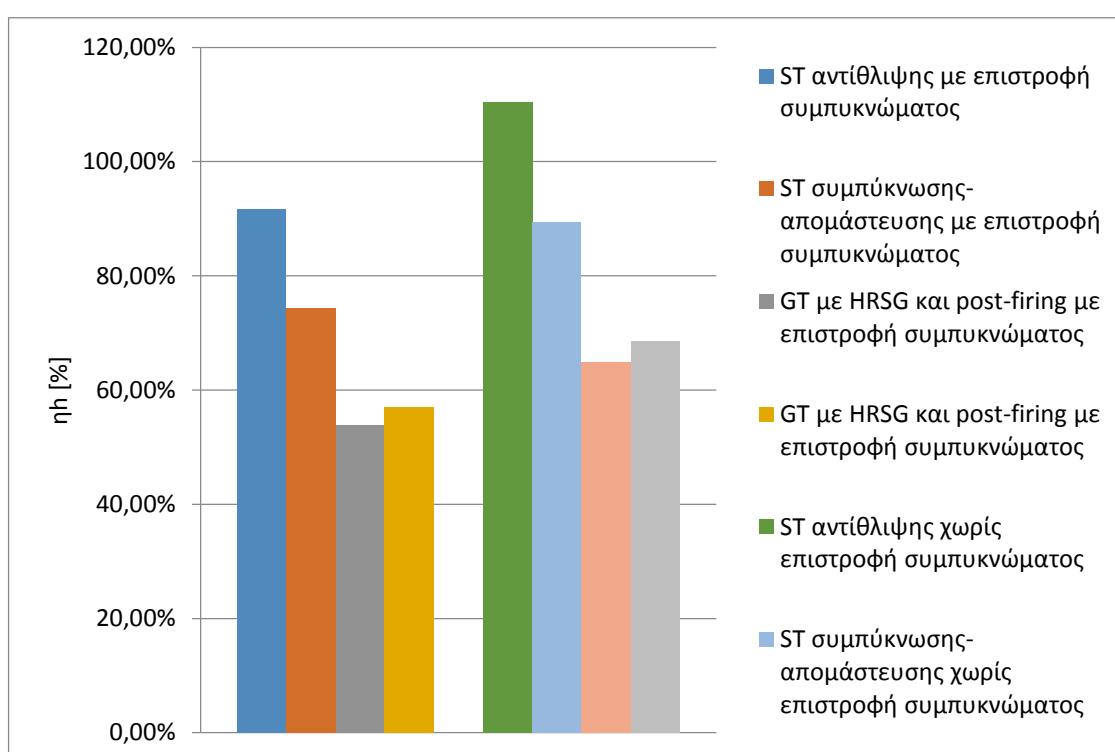
Θερμική Ισχύς		
	Με επιστροφή συμπυκνώματος	Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος
	Q_h [kW]	Q_h [kW]
ST αντίθλιψης	48936,23	58916,83
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	48936,23	58916,83
GT με HRSG	48921,58	58902,18
GT με HRSG και post-firing	48921,58	58902,18



Σχήμα 6.3: Θερμική Ισχύς

6.1.2.2 Θερμικός Βαθμός Απόδοσης

Θερμικός βαθμός απόδοσης		
	Με επιστροφή συμπυκνώματος	Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος
	η_h [%]	η_h [%]
ST αντίθλιψης	91,73	110,43
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	74,31	89,47
GT με HRSG	53,95	64,95
GT με HRSG και post-firing	57,00	68,63



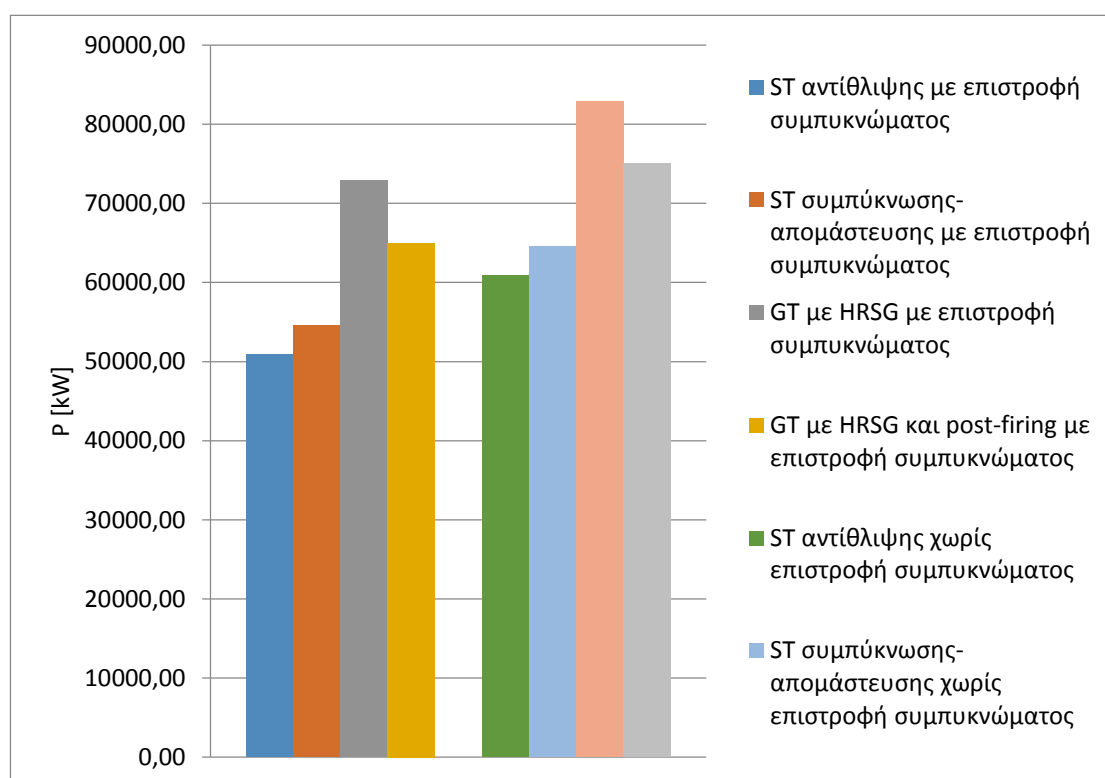
Σχήμα 6.4: Θερμικός Βαθμός Απόδοσης

Να τονιστεί ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης στη δεύτερη περίπτωση δεν υπολογίζεται με βάση τον ορθό από θερμοδυναμικής σκοπιάς τρόπο, αλλά με βάση την προγενέστερη νομοθεσία, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πολύ υψηλοί βαθμοί απόδοσης, ακόμα και μεγαλύτεροι του 100% στην περίπτωση ατμοστροβίλου αντίθλιψης. Το σφάλμα έγκειται στο ότι δεν λαμβάνεται υπόψη, βάση της νομοθεσίας, η επιστροφή του συμπυκνώματος, οπότε υπολογίζεται ένας βαθμός απόδοσης για μία μεταβολή και όχι για ένα κλειστό κύκλο.

6.1.3 Ολική Ενέργεια

6.1.3.1 Ολική Ισχύς

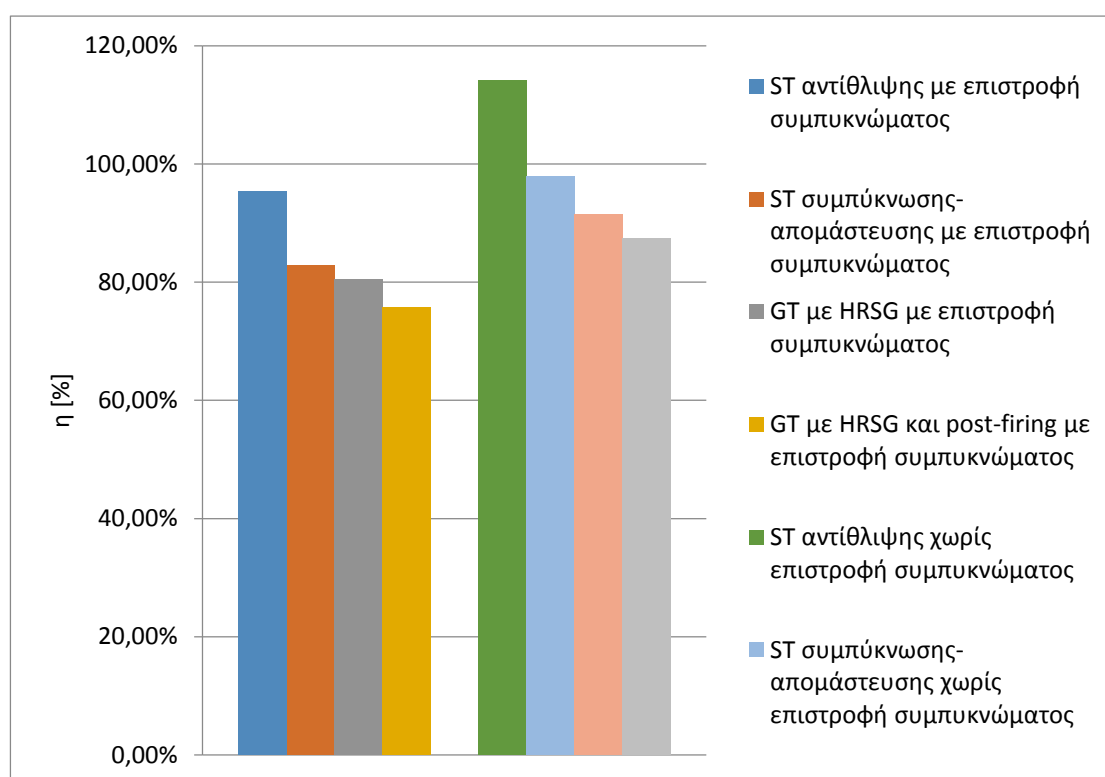
Ολική Ισχύς			
	Με επιστροφή συμπυκνώματος	Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος	
	P [kW]	P [kW]	
ST αντίθλιψης	50878,43	60859,03	
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	54532,33	64512,93	
GT με HRSG	72891,58	82872,18	
GT με HRSG και post-firing	65008,58	74989,18	



Σχήμα 6.5: Ολική Ισχύς

6.1.3.2 Ολικός Βαθμός Απόδοσης

Ολικός βαθμός απόδοσης		
	Με επιστροφή συμπυκνώματος	Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος
	η [%]	η [%]
ST αντίθλιψης	95,37	114,07
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	82,81	97,96
GT με HRSG	80,38	91,38
GT με HRSG και post-firing	75,75	87,38



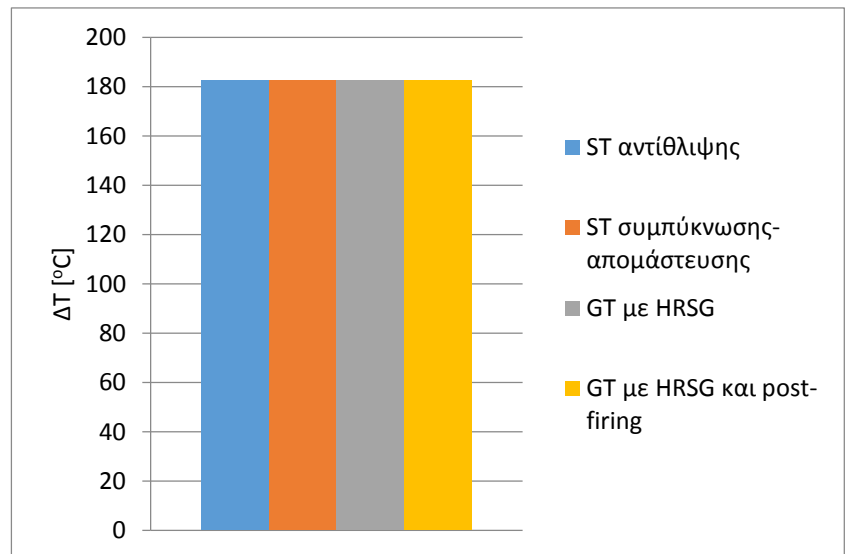
Σχήμα 6.6: Ολικός Βαθμός Απόδοσης

Όμοια, ο ολικός βαθμός απόδοσης στη δεύτερη περίπτωση δεν υπολογίζεται με βάση τον ορθό από θερμοδυναμικής σκοπιάς τρόπο, αλλά με βάση την προγενέστερη νομοθεσία. Το σφάλμα έγκειται στο ότι δεν λαμβάνεται υπόψη, βάση της νομοθεσίας, η επιστροφή του συμπυκνώματος, οπότε υπολογίζεται ένας βαθμός απόδοσης για μία μεταβολή και όχι για ένα κλειστό κύκλο.

6.1.4 Διαφορά Θερμοκρασίας στους Θερμικούς Καταναλωτές

6.1.4.1 Διαφορά Θερμοκρασίας στο Θερμικό Καταναλωτή Υψηλής Πίεσης

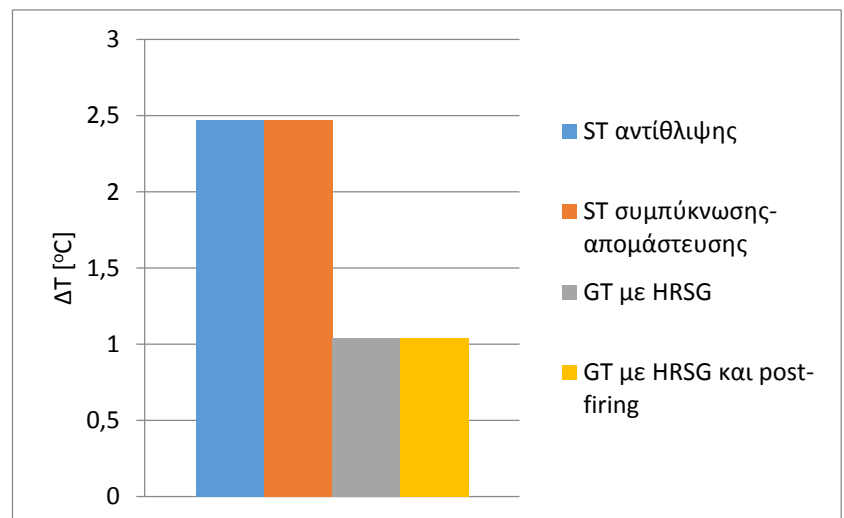
Διαφορά Θερμοκρασίας στο Heat Sink HP	
	ΔT [°C]
ST αντίθλιψης	182,53
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	182,53
GT με HRSG	182,53
GT με HRSG και post-firing	182,53



Σχήμα 6.7: Διαφορά Θερμοκρασίας στο Θερμικό Καταναλωτή Υψηλής Πίεσης

6.1.4.2 Διαφορά Θερμοκρασίας στο Θερμικό Καταναλωτή Χαμηλής Πίεσης

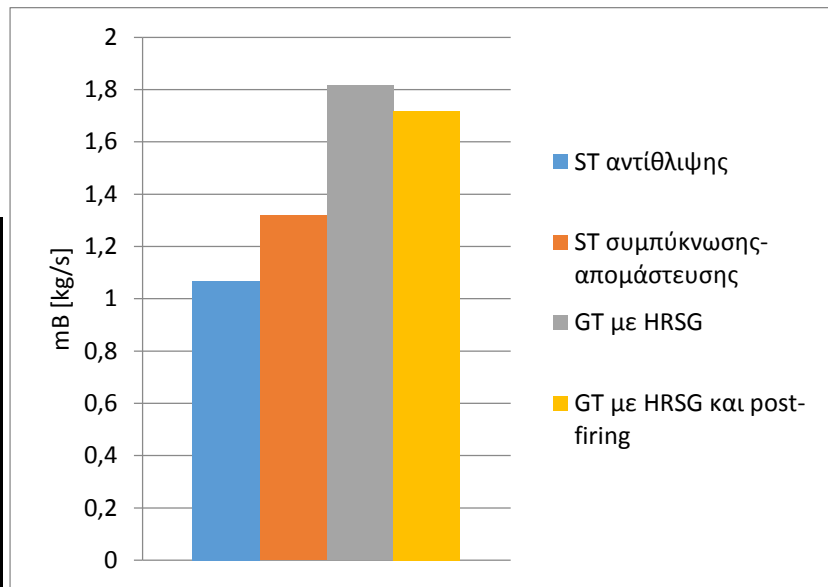
Διαφορά Θερμοκρασίας στο Heat Sink LP	
	ΔT [°C]
ST αντίθλιψης	2,47
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	2,47
GT με HRSG	1,04
GT με HRSG και post-firing	1,04



Σχήμα 6.8: Διαφορά Θερμοκρασίας στο Θερμικό Καταναλωτή Χαμηλής Πίεσης

6.1.4 Παροχή Καυσίμου

Παροχή Καυσίμου			
	m _{B1} [kg/s]	m _{B2} [kg/s]	m _B [kg/s]
ST αντίθλιψης	1,07	0	1,07
ST συμπύκνωσης- απομάστευσης	1,32	0	1,32
GT με HRSG	1,82	0	1,82
GT με HRSG και post-firing	1,48	0,24	1,72



Σχήμα 6.9: Παροχή Καυσίμου

6.1.2 Διαγράμματα Sankey, Grassmann

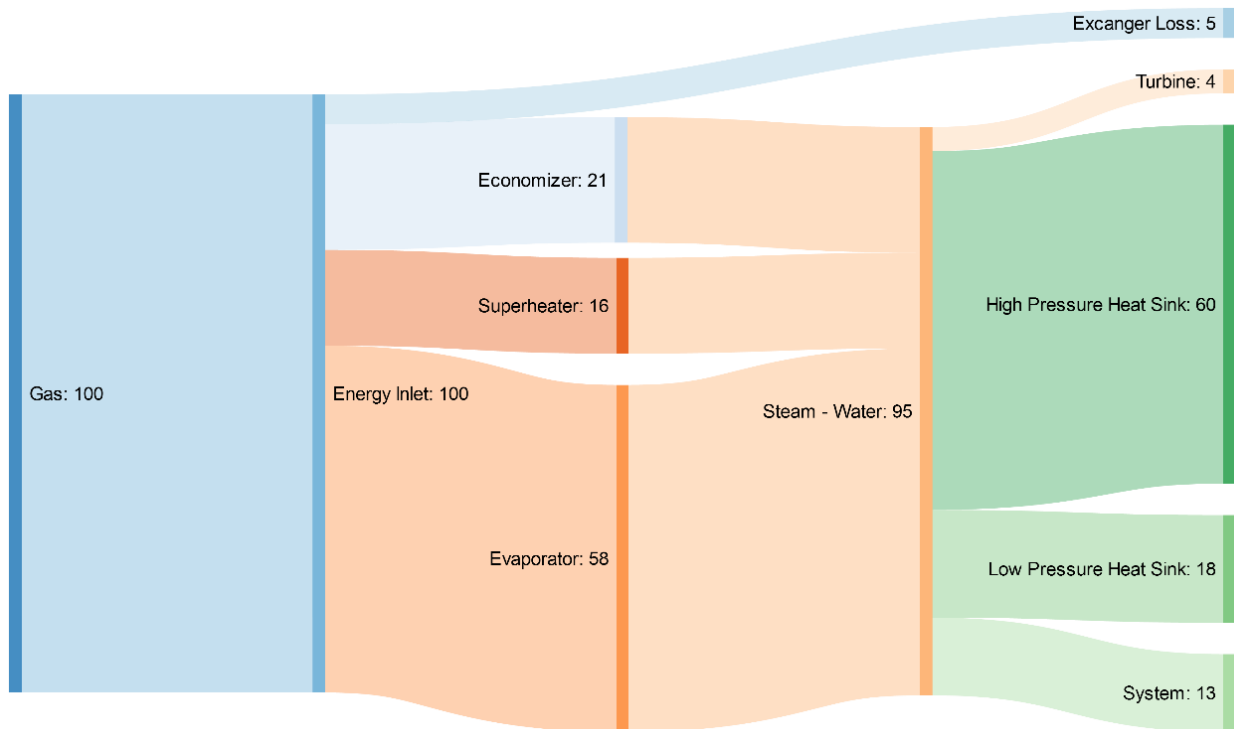
Διαγράμματα Sankey

- Ως 'Exchanger Loss' λογίζονται οι απώλειες καυσαερίου
- Ως 'Turbine' λογίζεται η ηλεκτρική ισχύς
- Ως 'High Pressure Heat Sink' λογίζεται η θερμική κατανάλωση υψηλής πίεσης
- Ως 'Low Pressure Heat Sink' λογίζεται η θερμική κατανάλωση χαμηλής πίεσης
- Ως 'System' λογίζονται οι ανάγκες και οι απώλειες του υπόλοιπου κυκλώματος σε ενέργεια. (Βοηθητικά κύκλου ατμού, συμπυκνωτής (Σενάριο B))

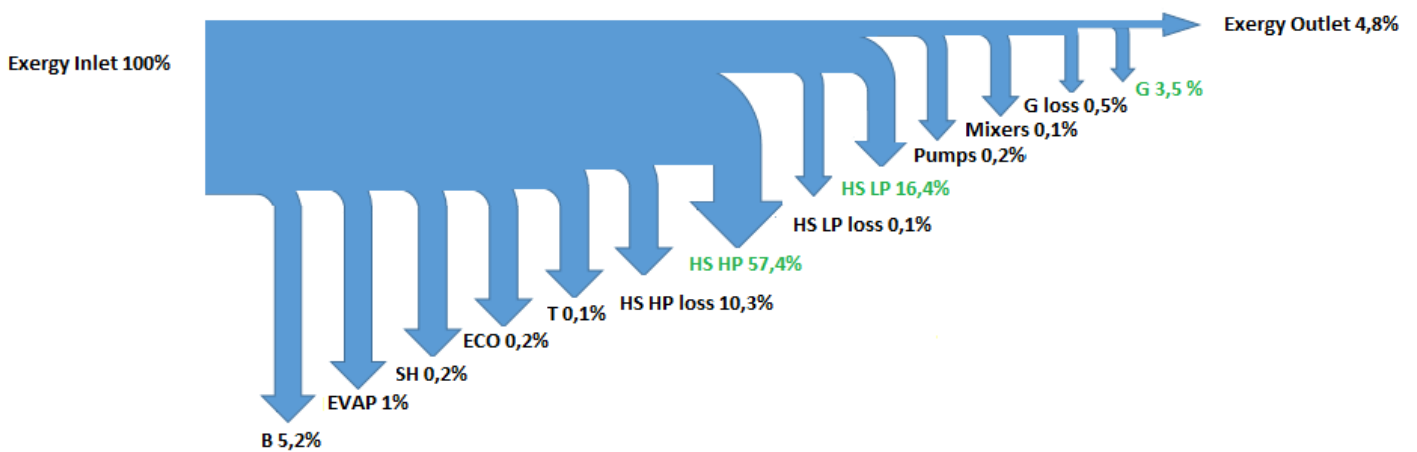
Διαγράμματα Grassmann

- B : Απώλεια εξέργειας στο Θάλαμο Καύσης
- EVAP : Απώλεια εξέργειας στον Ατμοποιητή
- SH : Απώλεια εξέργειας στον Υπερθερμαντή
- ECO : Απώλεια εξέργειας στον Προθερμαντή
- C : Απώλεια εξέργειας στο Συμπιεστή
- T : Απώλεια εξέργειας στο Στρόβιλο
- HS loss : Απώλεια εξέργειας στο Θερμικό Καταναλωτή
- HS : Παραγόμενη Θερμική εξέργεια
- Pumps : Απώλεια εξέργειας στις Αντλίες
- Mixers : Απώλεια εξέργειας στους Αναμικτές
- G loss : Απώλεια εξέργειας στη Γεννήτρια
- G : Παραγόμενη Ηλεκτρική εξέργεια

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

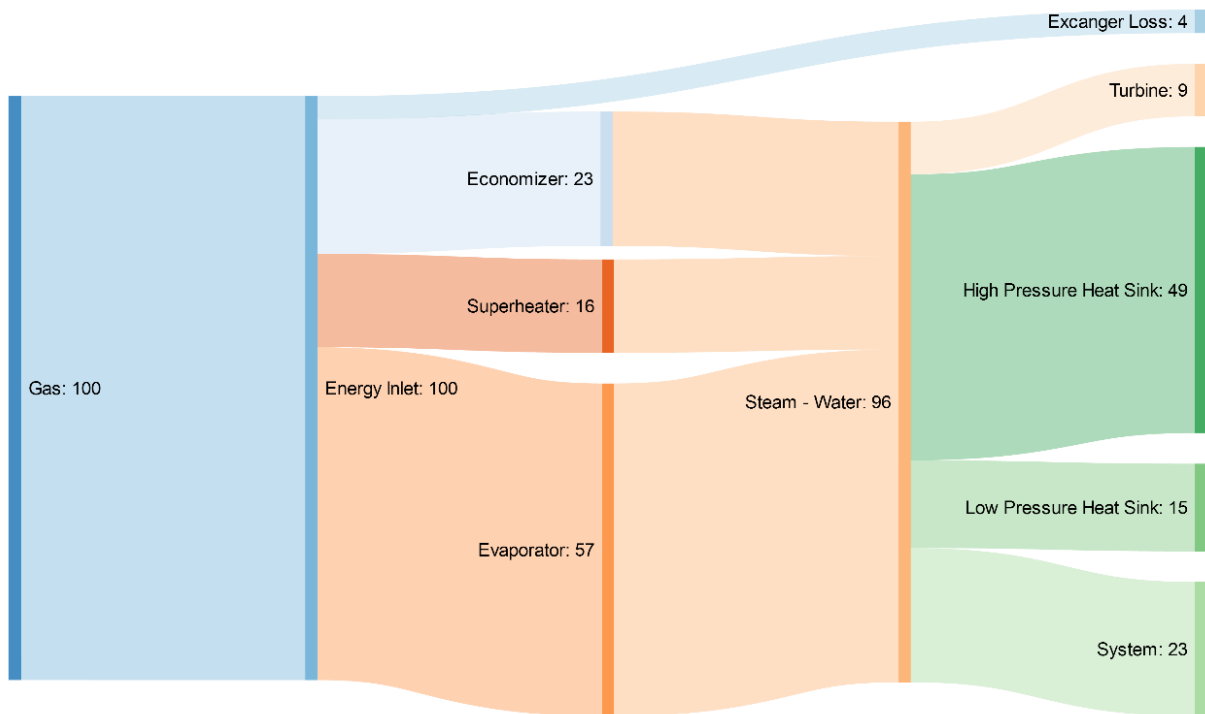


Σχήμα 6.10: Διάγραμμα Sankey

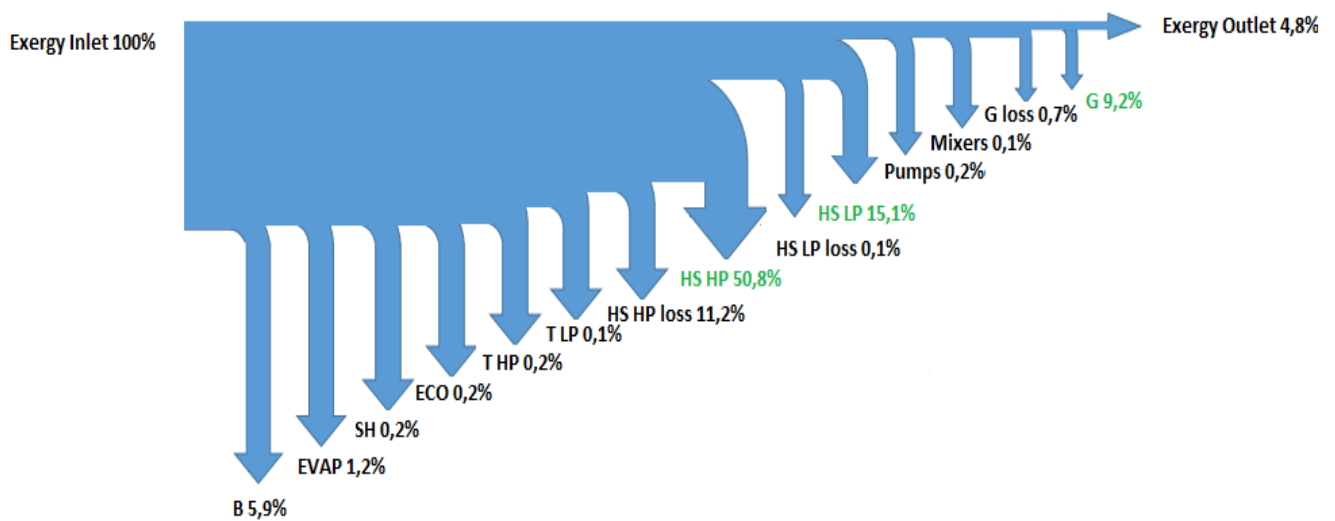


Σχήμα 6.11: Διάγραμμα Grassmann

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

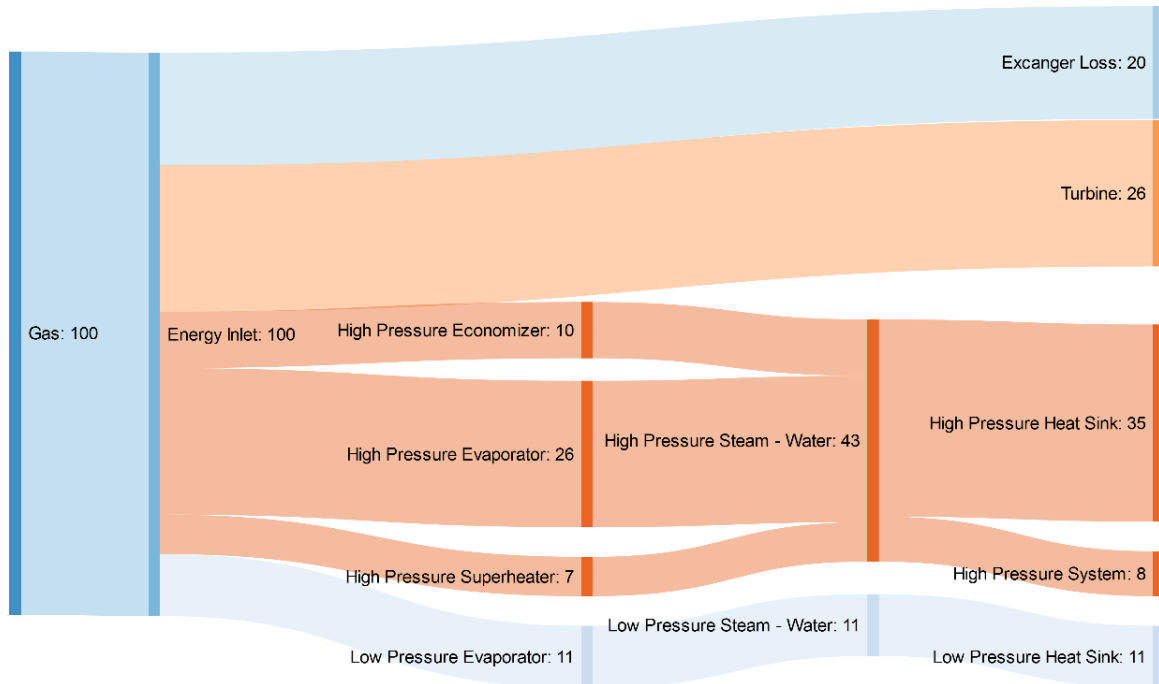


Σχήμα 6.12: Διάγραμμα Sankey

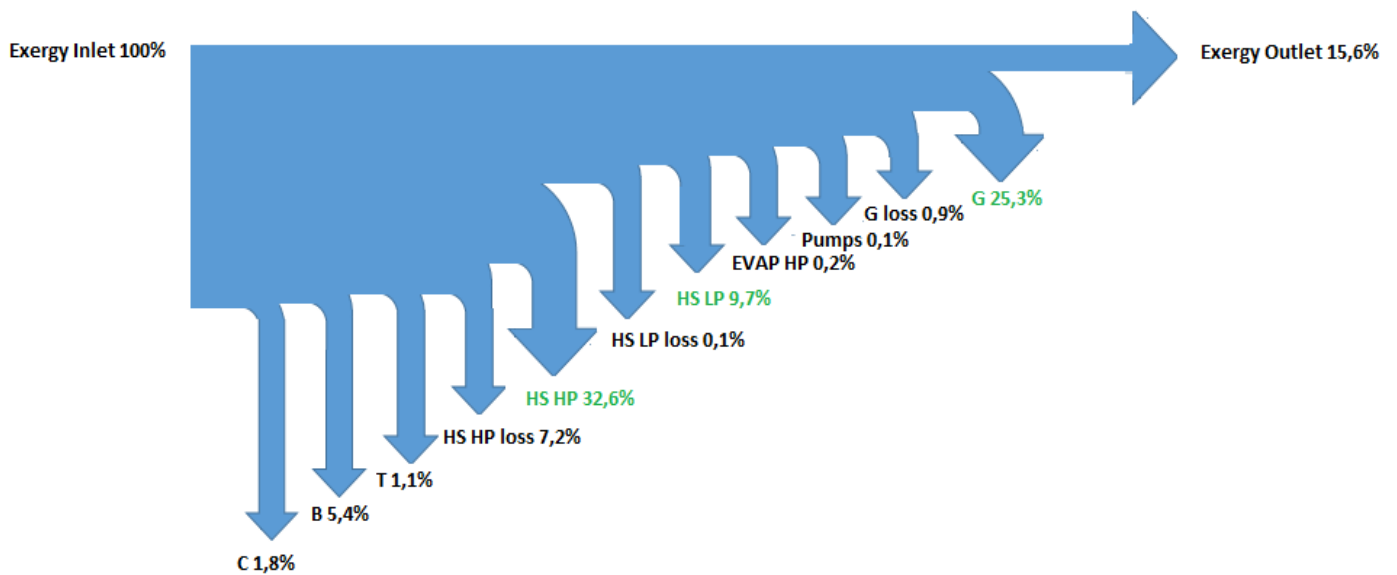


Σχήμα 6.13: Διάγραμμα Grassmann

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

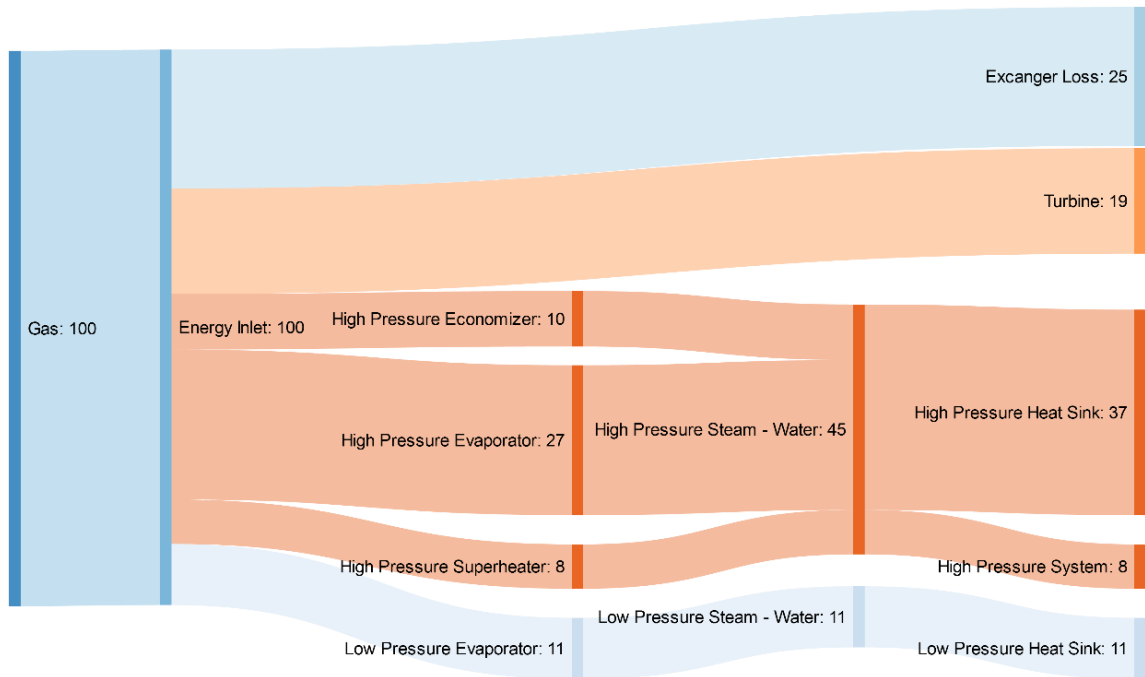


Σχήμα 6.14: Διάγραμμα Sankey

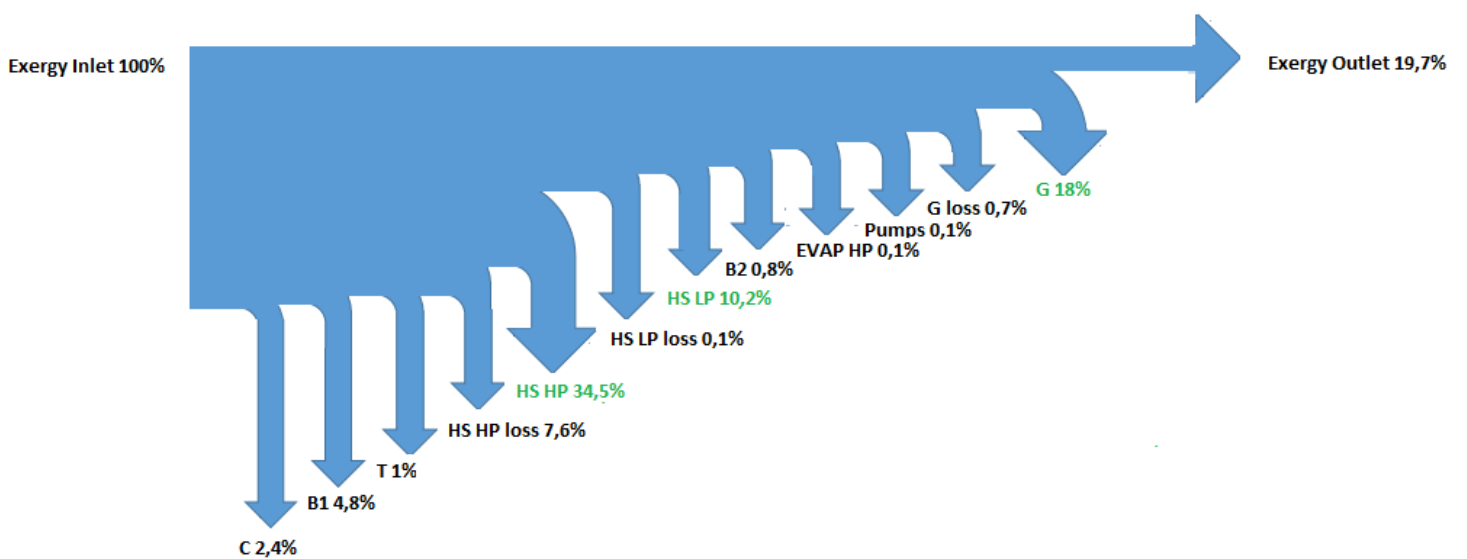


Σχήμα 6.15: Διάγραμμα Grassmann

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση



Σχήμα 6.16: Διάγραμμα Sankey

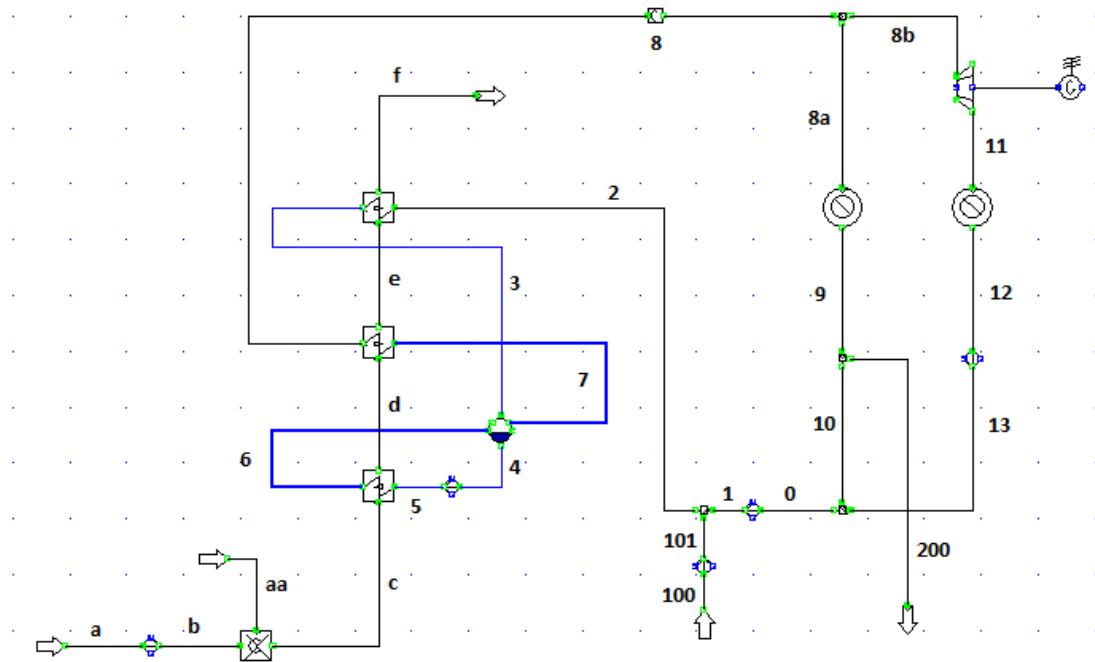


Σχήμα 6.17: Διάγραμμα Grassmann

6.1.3 Διαγράμματα T-s

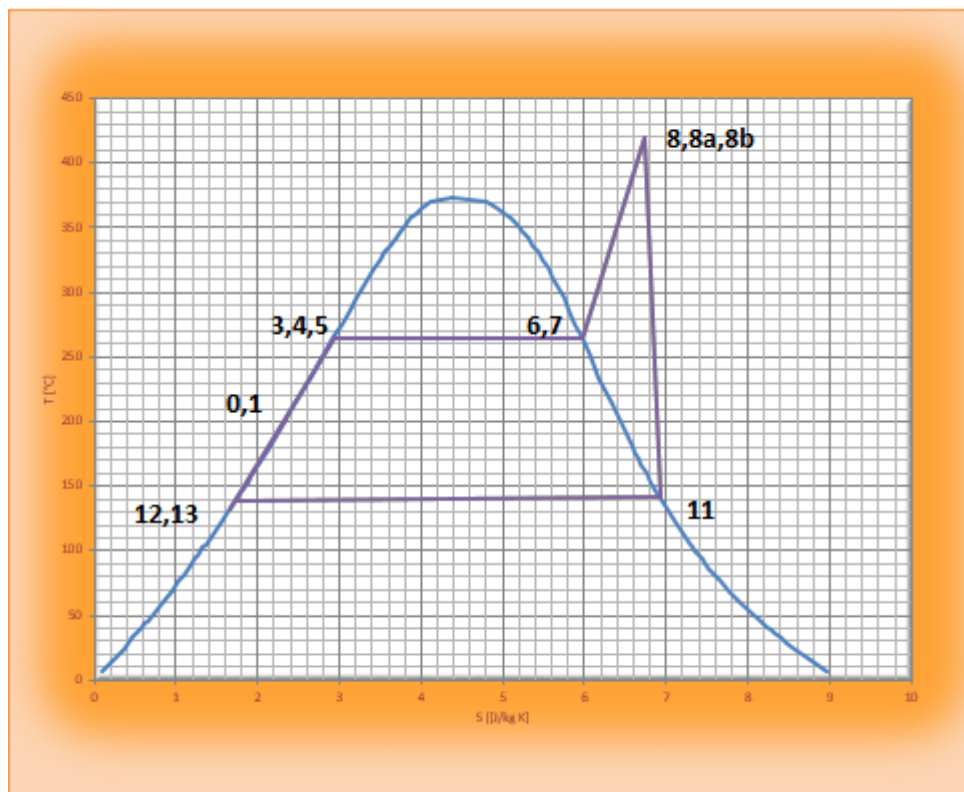
Το διάγραμμα T-s ενός θερμοδυναμικού κύκλου μας δείχνει το είδος της θερμοδυναμικής μεταβολής που υφίσταται στο σύστημα, καθώς και την δυνατότητα υπολογισμού των ενεργειών εισόδου και εξόδου στο σύστημα, και κατ' επέκταση και του βαθμού απόδοσής του.

Σενάριο Συμπαραγωγής A - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



Σχήμα 6.18: Σχηματική Εγκατάσταση Ατμοστρόβιλου Αντίθλιψης

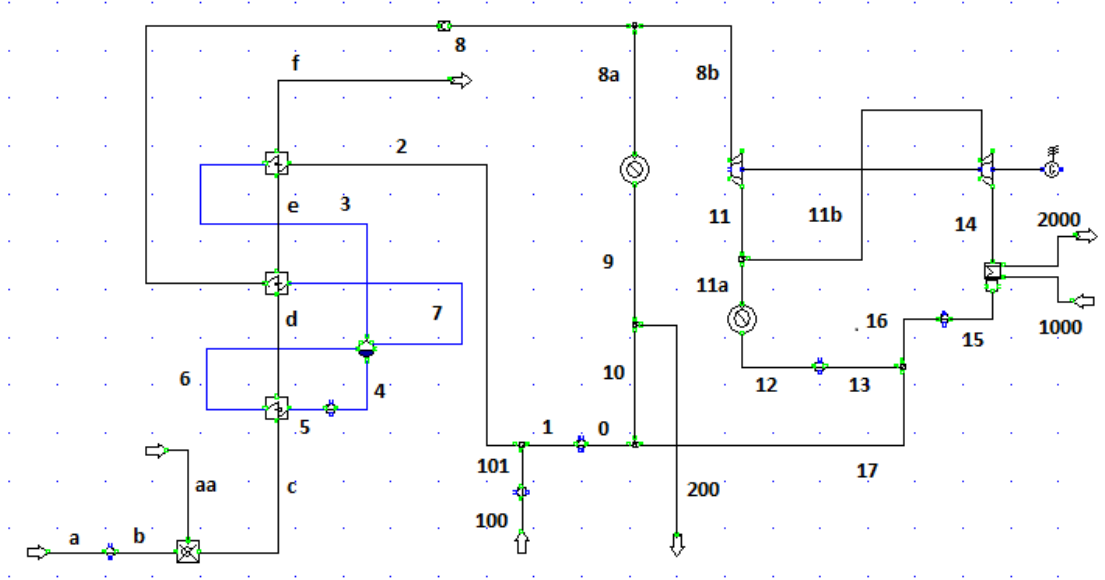
Σημείο	T (°C)	S (kJ/kgK)
0	201,36	2,34
1	201,92	2,34
2	132,37	1,65
3	264,62	2,93
4	264,6	2,93
5	264,69	2,93
6	264,77	5,97
7	264,62	5,97
8	420	6,74
8a	420	6,74
8b	420	6,74
9	237,47	2,68
10	237,45	2,68
11	141,47	6,94
12	139	1,73
13	139,62	1,73
0	201,36	2,34



Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα T-s Σεναρίου Συμπαραγωγής A

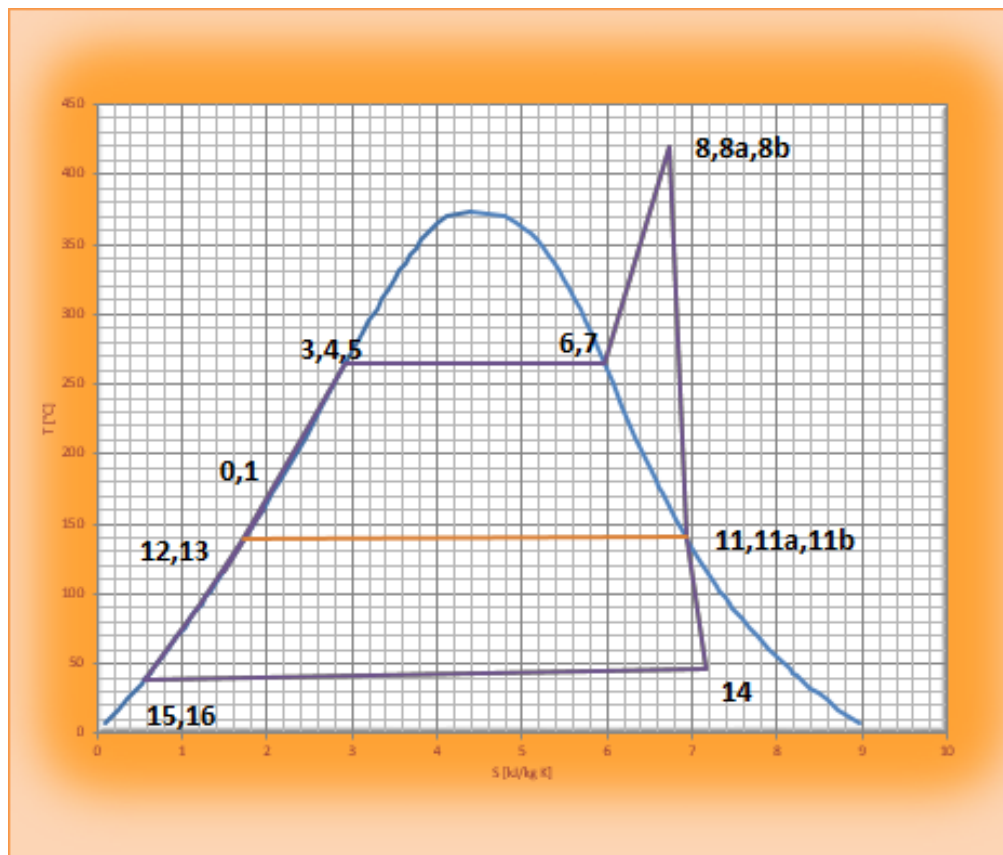
Στο Διάγραμμα 6.1, το τμήμα 11-12 δείχνει τη μεταβολή που γίνεται στη Θερμική Κατανάλωση Υψηλής Πίεσης.

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευση



Σχήμα 6.19: Σχηματική Εγκατάσταση Ατμοστρόβιλου Συμπύκνωσης – Απομάστευση

Σημείο	T (°C)	S (kJ/kgK)
0	161,24	1,95
1	161,7	1,95
2	116,3	1,48
3	264,62	2,93
4	264,6	2,93
5	264,69	2,93
6	264,77	5,97
7	264,62	5,97
8	420	6,74
8a	420	6,74
8b	420	6,74
9	237,47	2,68
10	237,45	2,68
11	141,47	6,94
11a	141,47	6,94
11b	141,47	6,94
12	139	1,73
13	139,62	1,73
14	45,808	7,17
15	39,001	0,56
16	39,449	0,57
17	95,445	1,22
0	161,24	1,95



Διάγραμμα 6.2: Διάγραμμα T-s Σεναρίου Συμπαραγωγής Β

Στο Διάγραμμα 6.2, το τμήμα 11-12 δείχνει τη μεταβολή που γίνεται στη Θερμική Κατανάλωση Υψηλής Πίεσης. Το τμήμα 14-15 δείχνει τη μεταβολή που γίνεται στη Θερμική Κατανάλωση Χαμηλής Πίεσης.

6.1.4 Διαγράμματα T-Q

Το διάγραμμα T-Q μιας εγκατάστασης με Λέβητα (Ανάκτησης Θερμότητας) αποτελείται από δύο ρεύματα. Το ρεύμα του νερού – ατμού και το ρεύμα του καυσαερίου. Με τη βοήθεια του διαγράμματος αυτού έχουμε μία εικόνα για τις θερμοκρασιακές μεταβολές που υφίστανται στους εναλλάκτες. Επίσης, μπορούμε να εντοπίσουμε σε πιο σημείο βρίσκεται η μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ καυσαερίου και νερού – ατμού, καθώς και πόσο είναι αυτή (Pinch Point).

Με βάση τις αρχικές παραδοχές, για κάθε εγκατάσταση ισχύει:

$$\text{Pinch Point} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

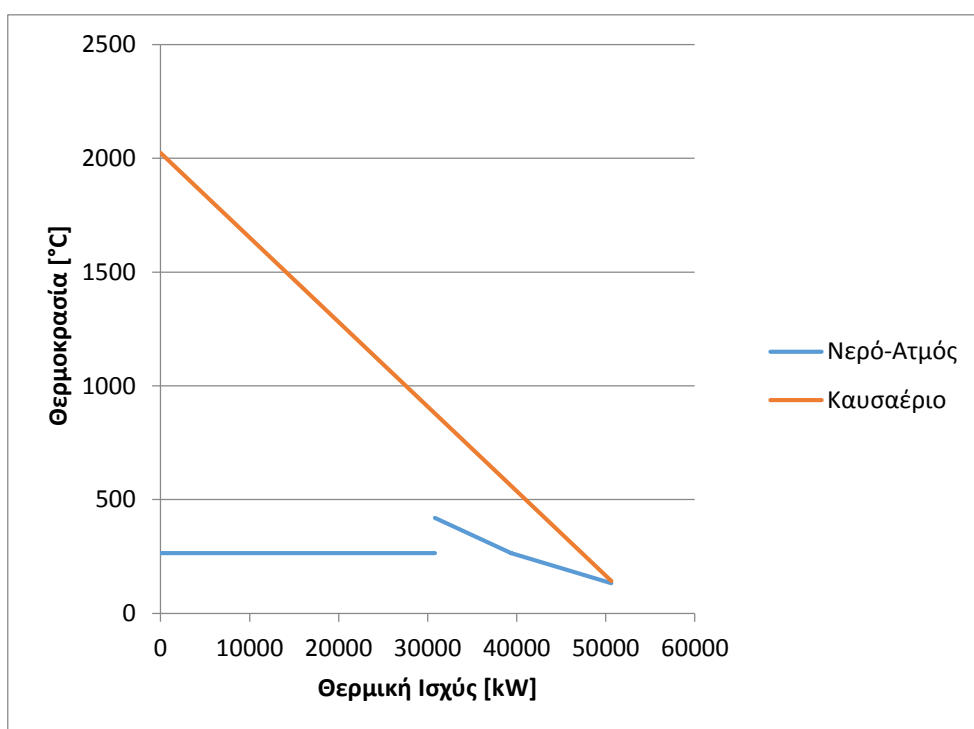
Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

	EVAP	SH	ECO
T_{in} Καυσαερίου [°C]	2024,2	945,11	617,26
T_{out} Καυσαερίου [°C]	945,11	617,26	142,37
T_{in} Νερού-Ατμού [°C]	132,37	264,69	264,62
T_{out} Νερού-Ατμού [°C]	264,62	264,77	420
Q_{trans} [kW]	30812	8550,9	11268
ΣQ [kW]	30812	39362,9	50630,9

Πίνακας 6.1: Σημεία T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Α

Pinch Point	
T Καυσαερίου [°C]	142,37
T Νερού-Ατμού [°C]	132,37
ΔT [K]	10

Πίνακας 6.2: Pinch Point Σεναρίου Συμπαραγωγής Α



Διάγραμμα 6.3: Διάγραμμα T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Α

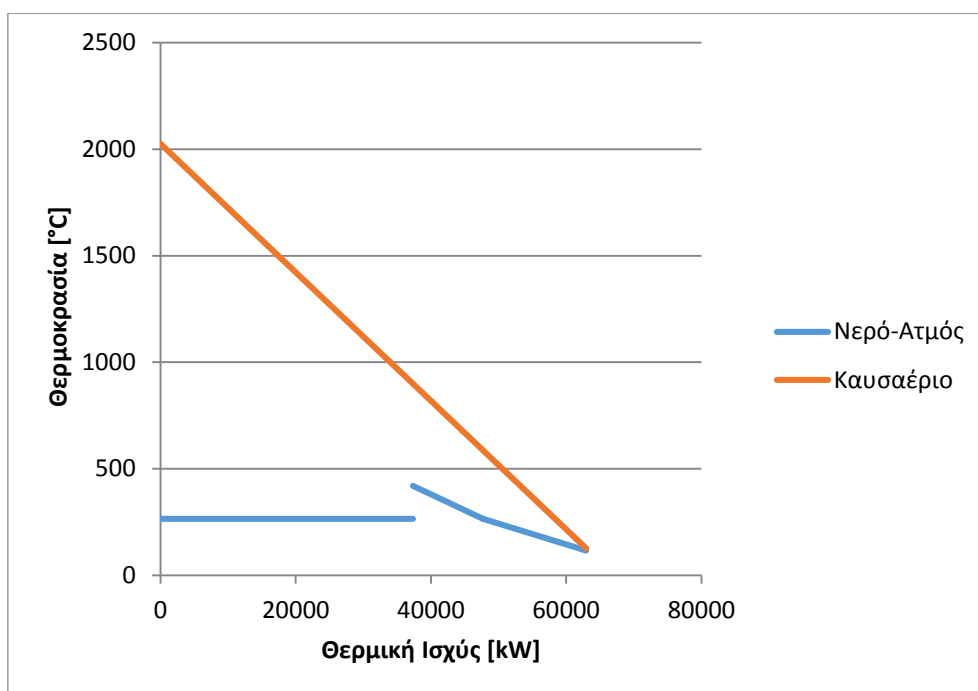
Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

	EVAP	SH	ECO
T_{in} Καυσαερίου [°C]	2024,2	965,5	645,03
T_{out} Καυσαερίου [°C]	965,5	645,03	126,3
T_{in} Νερού-Ατμού [°C]	116,3	264,69	264,62
T_{out} Νερού-Ατμού [°C]	264,62	264,77	420
Q_{trans} [kW]	37354	10366	15216
ΣQ [kW]	37354	47720	62936

Πίνακας 6.3: Σημεία T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Β

Pinch Point	
T Καυσαερίου [°C]	126,3
T Νερού-Ατμού [°C]	116,3
ΔT [K]	10

Πίνακας 6.4: Pinch Point Σεναρίου Συμπαραγωγής Β



Διάγραμμα 6.4: Διάγραμμα T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Β

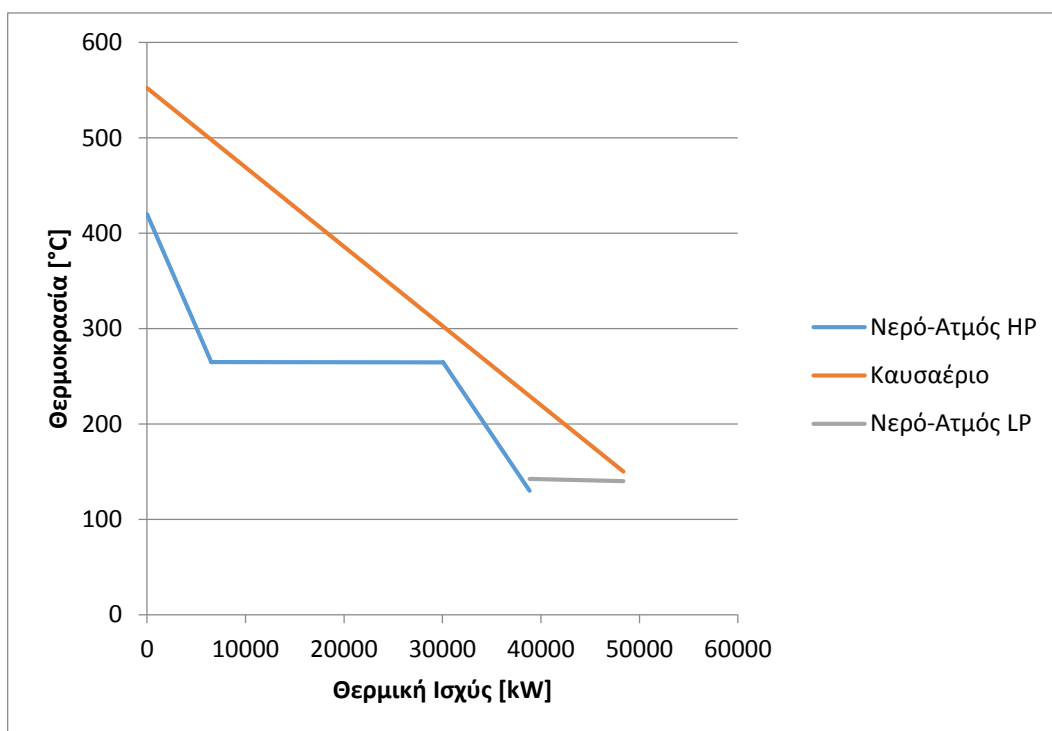
Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

	SH_HP	EVAP_HP	ECO_HP	EVAP_LP
T_{in} Καυσαερίου [°C]	552,21	500,04	306,58	232,34
T_{out} Καυσαερίου [°C]	500,04	306,58	232,34	150,13
T_{in} Νερού-Ατμού [°C]	264,62	264,69	130	140,13
T_{out} Νερού-Ατμού [°C]	420	264,77	264,62	142,4
Q_{trans} [kW]	6535,7	23551	8757,2	9537,5
ΣQ [kW]	6535,7	30086,7	38843,9	48381,4

Πίνακας 6.5: Σημεία T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Γ

Pinch Point	
T Καυσαερίου [°C]	150,13
T Νερού-Ατμού [°C]	140,13
ΔT [K]	10

Πίνακας 6.6: Pinch Point Σεναρίου Συμπαραγωγής Γ



Διάγραμμα 6.5: Διάγραμμα T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Γ

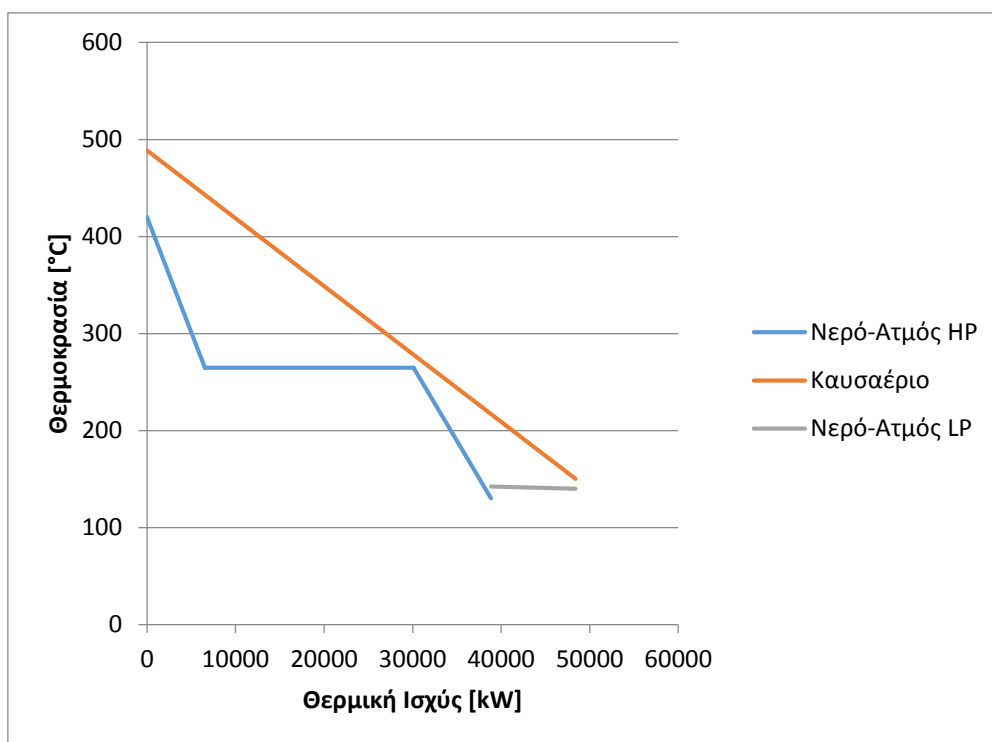
Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

	SH_HP	EVAP_HP	ECO_HP	EVAP_LP
T _{in} Καυσαερίου [°C]	488,69	444,47	281,2	218,9
T _{out} Καυσαερίου [°C]	444,47	281,2	218,9	150,13
T _{in} Νερού-Ατμού [°C]	264,62	264,69	130	140,13
T _{out} Νερού-Ατμού [°C]	420	264,77	264,62	142,4
Q _{trans} [kW]	6535,7	23551	8757,2	9537,5
ΣQ [kW]	6535,7	30086,7	38843,9	48381,4

Πίνακας 6.7: Σημεία T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Δ

Pinch Point	
T Καυσαερίου [°C]	150,13
T Νερού-Ατμού [°C]	140,13
ΔT [K]	10

Πίνακας 6.8: Pinch Point Σεναρίου Συμπαραγωγής Δ



Διάγραμμα 6.6: Διάγραμμα T-Q Σεναρίου Συμπαραγωγής Δ

6.1.5 Παρατηρήσεις

Έπειτα από την παραπάνω θερμοδυναμική μελέτη παρατηρούμε ότι:

- Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης στα συστήματα παραγωγής ενέργειας με αεριοστρόβιλο είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με αυτά τα οποία χρησιμοποιούν ατμοστρόβιλο, όπως και αναμενόταν.
- Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης είναι μεγαλύτερος από αυτόν της εγκατάστασης με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης, κάτι το οποίο είναι λογικό δεδομένης της εκτόνωσης μέρους του εργαζόμενου μέσου μέχρι πολύ χαμηλές πιέσεις σε σχέση με τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.
- Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας, στον οποίο γίνεται μετάκαυση, είναι αρκετά μικρότερος από αυτόν της εγκατάστασης με αεριοστρόβιλο χωρίς μετάκαυση. Αυτό συμβαίνει διότι το καυσαέριο έχει χαμηλότερα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και κατά την εκτόνωση στον στρόβιλο, αλλά και αμέσως μετά από αυτόν. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο ενισχύεται στη συνέχεια με επιπλέον καύση.
- Η θερμική ισχύς είναι η ίδια για όλες τις εγκαταστάσεις, αλλά λόγω της διαφορετικής παροχής καυσίμου, ο θερμικός βαθμός απόδοσης κάθε εγκατάστασης αλλάζει. Βέλτιστο θερμικό βαθμό απόδοσης έχουμε στην εγκατάσταση με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης και ακολουθούν η εγκατάσταση με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης, η εγκατάσταση με αεριοστρόβιλο και μετάκαυση και τέλος η εγκατάσταση με αεριοστρόβιλο χωρίς μετάκαυση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στα δύο πρώτα σενάρια, έχουμε χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και έτσι, το περισσότερο καύσιμο καταναλώνεται για την παραγωγή της θερμικής ενέργειας.
- Η ολική ισχύς είναι μεγαλύτερη για τις εγκαταστάσεις με αεριοστρόβιλο ενώ ο ολικός βαθμός απόδοσης μεγαλύτερος για τις εγκαταστάσεις με ατμοστρόβιλο. Αυτό συμβαίνει διότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι ποιοτικά ανώτερη από τη θερμική και παράγεται δυσκολότερα. Έτσι, στα σενάρια Γ, Δ χρησιμοποιείται περισσότερο καύσιμο, το οποίο οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος αλλά και μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης. Μάλιστα, τη μεγαλύτερη παροχή καυσίμου τη συναντάμε στο σύστημα αεριοστρόβιλου χωρίς μετάκαυση, όπου απαιτούνται υψηλά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά στο καυσαέριο, με σκοπό την παραγωγή της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι η θερμοδυναμικά βέλτιστη εγκατάσταση είναι αυτή με τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης. Ακολουθούν η εγκατάσταση με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης, η εγκατάσταση με αεριοστρόβιλο χωρίς μετάκαυση και τέλος η εγκατάσταση με αεριοστρόβιλο και μετάκαυση.

Ακόμα, στα διαγράμματα Sankey, Grassmann παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και της εξέργειας αποβάλλεται στους θερμικούς καταναλωτές.

Παρατηρούμε επίσης ότι το Pinch Point εμφανίζεται στην είσοδο του προθερμάντη (είσοδος νερού – ατμού) στους λέβητες. Αντίθετα, στους λέβητες ανάκτησης θερμότητας, εμφανίζεται στην είσοδο του ατμοποιήτη υψηλής πίεσης.

6.2 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας των μονάδων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

6.2.1 Με επιστροφή συμπυκνώματος

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 1,94$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 48,94$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 53,35$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{hr} = 0,835$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), $PESR = 14,72\%$

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου αντίθλιψης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου β) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta = 95,37\% > 75\%$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής.

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 5,96$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 48,94$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 65,85$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{hr} = 0,835$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), $PESR = 5,93\%$

Η μονάδα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ διότι $PESR < 10\%$.

Αξιολόγηση $PESR_{CHP}$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.2-4.7), $PESR_{CHP}=2,86\%$

Το συμπαραγωγικό μέρος της μονάδας δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ διότι $PESR_{CHP}<10\%$.

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου γ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,80$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta=82,81\% > 80\%$. Παρόλα αυτά η μονάδα δε βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους ή μερικούς συμπαραγωγής διότι $PESR_{CHP}<10\%$.

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 23,97$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 48,92$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 90,69$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{hr} = 0,835$

Αξιολόγηση $PESR$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), $PESR=15,60\%$

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου δ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta=80,38\% > 75\%$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής.

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 16,09$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 48,92$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 85,82$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{hr} = 0,835$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), $PESR=6,08\%$

Η μονάδα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ διότι $PESR<10\%$.

Αξιολόγηση $PESR_{CHP}$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (4.2-4.7), $PESR_{CHP}=5,28\%$

Το συμπαραγωγικό μέρος της μονάδας δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ΣΗΘΥΑ διότι $PESR_{CHP}<10\%$.

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου δ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta=75,75\% > 75\%$. Παρόλα αυτά η μονάδα δε βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους ή μερικούς συμπαραγωγής διότι $PESR_{CHP}<10\%$.

6.2.2 Χωρίς επιστροφή συμπυκνώματος

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e=1,94$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 58,92$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 53,35$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{nr} = 0,866$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), $PESR=25,89\%$

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου αντίθλιψης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου β) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta=114,07\% > 75\%$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής.

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 5,96$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 58,92$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 65,85$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{nr} = 0,866$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), PESR=17,10%

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου γ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,80$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta = 97,96\% > 80\%$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής.

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 23,97$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 58,90$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 90,69$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{nr} = 0,866$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), PESR=22,41%

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπαραγωγής τύπου δ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπαραγωγής προκύπτει $\eta = 91,38\% > 75\%$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής.

Σενάριο Συμπααραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ισχύος, $P_e = 16,09$ MW
2. Παραγωγή Θερμικής Ισχύος, $H_{CHP} = 58,9$ MW
3. Ισχύς Καυσίμου, $F_c = 85,82$ MW
4. Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή ηλεκτροπαραγωγή, $\eta_{er} = 0,491$
Βαθμός απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ισχύος, $\eta_{nr} = 0,866$

Αξιολόγηση PESR

Σύμφωνα με τη σχέση (4.1), PESR=14,87%

Για ΣΗΘ τύπου ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (τεχνολογία συμπααραγωγής τύπου δ) το κατώφλι του ολικού βαθμού απόδοσης ορίζεται στο $\eta_{κατ} = 0,75$.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ο ολικός βαθμός απόδοσης της συμπααραγωγής προκύπτει $\eta=87,38\% > 0,75$. Αυτό σημαίνει ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπααραγωγής.

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των μονάδων συμπααραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας των τεσσάρων τεχνολογιών συμπααραγωγής.

Σενάριο Συμπααραγωγής	Χρήση Συμπυκνώματος	PESR	PESR _{CHP}
ST αντίθλιψης	Με Συμπύκνωμα	14,72%	14,72%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	25,89%	25,89%
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	Με Συμπύκνωμα	5,93%	2,86%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	17,10%	17,10%
GT με HRSG	Με Συμπύκνωμα	15,60%	15,60%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	22,41%	22,41%
GT με HRSG και post-firing	Με Συμπύκνωμα	6,08%	5,28%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	14,87%	14,87%

Πίνακας 6.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων

6.2.3 Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι, λαμβάνοντας υπόψιν μη επιστροφή συμπυκνώματος στην ενεργειακή αξιολόγηση προκύπτει PESR>10% και κατάσταση πλήρους συμπαραγωγής για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Αντιθέτως στην περίπτωση που αφαιρείται το συμπύκνωμα από την ωφέλιμη θερμότητα, για τις περιπτώσεις B, η μονάδα δεν είναι ΣΗΘΥΑ (PESR<10% και PESR_{CHP}<10% αντίστοιχα).

Συνεπώς, η νέα νομοθεσία θα είναι λιγότερο ελαστική ως προς το χαρακτηρισμό μίας μονάδας ως ΣΗΘΥΑ.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι δείκτες PESR για τα σενάρια A, B, Δ αξιολογώντας αρχικά όλη την εγκατάσταση και στη συνέχεια μόνο το συμπαραγωγικό μέρος της.

Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας όλης της εγκατάστασης					
Τεχνολογία Συμπαραγωγής	Χρήση Συμπυκνώματος	PESR	PESRCHP	Βαθμός Απόδοσης	Κατώτερο όριο βαθμού απόδοσης
ST αντίθλιψης	Με Συμπύκνωμα	14,72%	14,72%	95%	75%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	25,89%	25,89%	114%	75%
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	Με Συμπύκνωμα	5,93%	2,86%	83%	80%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	17,10%	17,10%	98%	80%
GT με HRSG και post-firing	Με Συμπύκνωμα	6,08%	5,28%	76%	75%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	14,87%	14,87%	87%	75%

Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας του συμπαραγωγικού μέρους της εγκατάστασης					
Τεχνολογία Συμπαραγωγής	Χρήση Συμπυκνώματος	PESR	PESRCHP	Βαθμός Απόδοσης	Κατώτερο όριο βαθμού απόδοσης
ST αντίθλιψης	Με Συμπύκνωμα	14,70%	14,70%	88%	75%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	26,99%	26,99%	107%	75%
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	Με Συμπύκνωμα	-17,30%	11,78%	57%	80%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	-5,35%	9,77%	66%	80%
GT με HRSG και post-firing	Με Συμπύκνωμα	5,89%	7,52%	73%	75%
	Χωρίς Συμπύκνωμα	16,43%	16,43%	87%	75%

Πίνακας 6.10: Δείκτης PESR των σεναρίων A, B, Δ

Ως συμπαραγωγικό μέρος ορίζεται το τμήμα εκείνο της εγκατάστασης το οποίο θα μπορούσε να αποτελέσει σύστημα συμπαραγωγής. Στην περίπτωση του σεναρίου A, ως συμπαραγωγικό μέρος λογίζεται η εγκατάσταση χωρίς τη θερμική κατανάλωση υψηλής πίεσης καθώς και το αντίστοιχο καύσιμο που απαιτείται για την παραγωγή της, θεωρώντας έναν τυπικό βαθμό απόδοσης λέβητα για την ανεξάρτητη παραγωγή θερμικής ενέργειας (90%). Αυτό συμβαίνει διότι η παραγωγή της θερμότητας αυτής μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, χωρίς να έχει επίδραση στο υπόλοιπο σύστημα. Ομοίως και στο σενάριο B. Όσον αφορά το σενάριο Δ, ως συμπαραγωγικό μέρος λογίζεται όλη η εγκατάσταση χωρίς το καύσιμο για την μετάκαυση καθώς και την αντίστοιχη θερμότητα που παράγεται από αυτό. Και σε αυτή την περίπτωση η μετάκαυση μπορεί να γίνει ξεχωριστά από τις υπόλοιπες διεργασίες.

Παρατηρούμε ότι στα σενάρια A, Δ η μεταβολή στον δείκτη PESR είναι μικρή. Προκύπτουν έτσι τα ίδια συμπεράσματα για τις δύο αυτές εγκαταστάσεις. Όσον αφορά το σενάριο B, είτε με επιστροφή συμπυκνώματος (PESR<0 και βαθμός απόδοσης <80%) είτε χωρίς επιστροφή (PESR<0, PESR_{CHP}<10% και βαθμός απόδοσης <80%), συμπεραίνουμε ότι η εγκατάσταση δεν είναι ΣΗΘΥΑ.

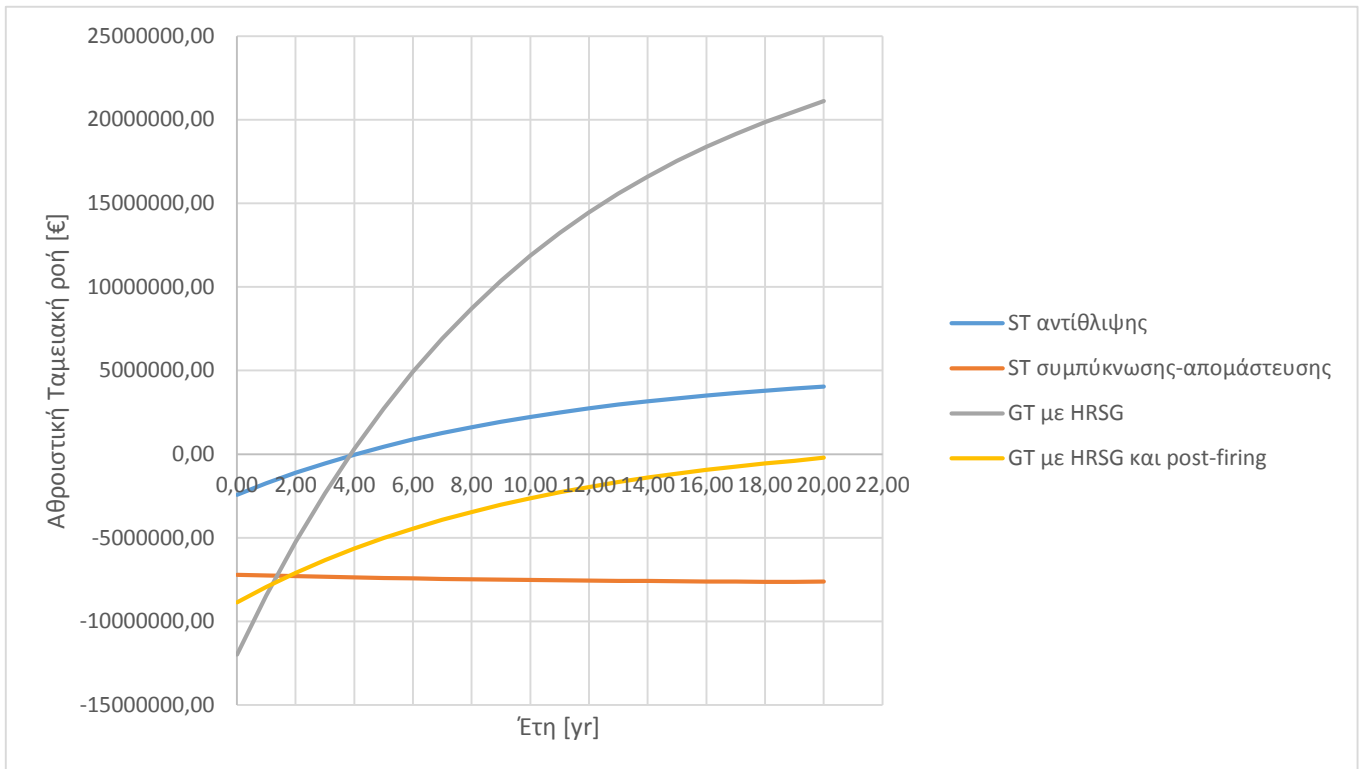
6.3 Οικονομική Ανάλυση

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα έσοδα και τα έξοδα της κάθε εγκατάστασης.

	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
Ηλεκτρική Ισχύς [MW _{el}]	1,94	5,6	23,97	16,09
Θερμική Ισχύς [MW _{th}]	48,94	48,94	48,92	48,92
Ετήσιες Ώρες Λειτουργίας	8500	8500	8500	8500
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΑΘΙ]	25	25	25	25
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΚΘΙ]	27,78	27,78	27,78	27,78
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/yr]	12.596.734	15.548.946	21.412.088	20.263.866
Ισχύς Καυσίμου [MW ΚΘΙ]	53,35	65,85	90,69	85,82
Κατηγορία Έργου	1 MW < ΣΗΘΥΑ <= 5 MW	5 MW < ΣΗΘΥΑ <= 10 MW	10 MW < ΣΗΘΥΑ <= 35 MW	10 MW < ΣΗΘΥΑ <= 35 MW
Κόστος Εγκατάστασης CAPEX [€/kW _{el}]	1000	1200	500	550
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€/kW _{th}]	10	10	0	0
Κόστος Λειτουργίας OPEX [€/yr]	38.844	134.306	239.700	239.700
Παροχή Καυσαερίου [kg/s]	19,67	24,27	108,81	131,22
Ποσοστό CO ₂ στο Καυσαέριο [kg/kg]	14,93%	14,93%	4,59%	3,60%
Κόστος Εκπομπών CO ₂ [€/yr]	669.564,83	826.460,58	1.138.065,94	1.077.531,83
Μέση τιμή δικαιωμάτων CO ₂ [€/tn]	7,45	7,45	7,45	7,45
Μέσο κόστος CO ₂ [€/MWh]	0,96	0,96	0,96	0,96
Τιμή αναφοράς θερμικού βαθμού απόδοσης (ηhr)	0,81	0,81	0,81	0,81
ΜΤΦΑη [€/MWh]	25	25	25	25
Προσαρμογή τιμής φυσικού αερίου(ΠΤ)(ΜΤΦΑη) [€/MWh]	-0,06	-0,05	-0,06	-0,06
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας Χωρίς Δημόσια Ενίσχυση [€/MWh]	83,94	73,95	71,94	71,94
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας Χωρίς Δημόσια Ενίσχυση [€/yr]	1.385.728,55	3.517.353,77	14.657.270,53	14.657.270,53
Ισχύς ΦΑ που θα χρειαζόμασταν για τη θερμική ισχύς [MWh] ΚΘΙ	462175,52	462175,52	462037,14	462037,14
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€/yr]	12.838.208,91	12.838.208,91	12.834.365,02	12.834.365,02

Πίνακας 6.11: Έσοδα-Έξοδα για κάθε εγκατάσταση

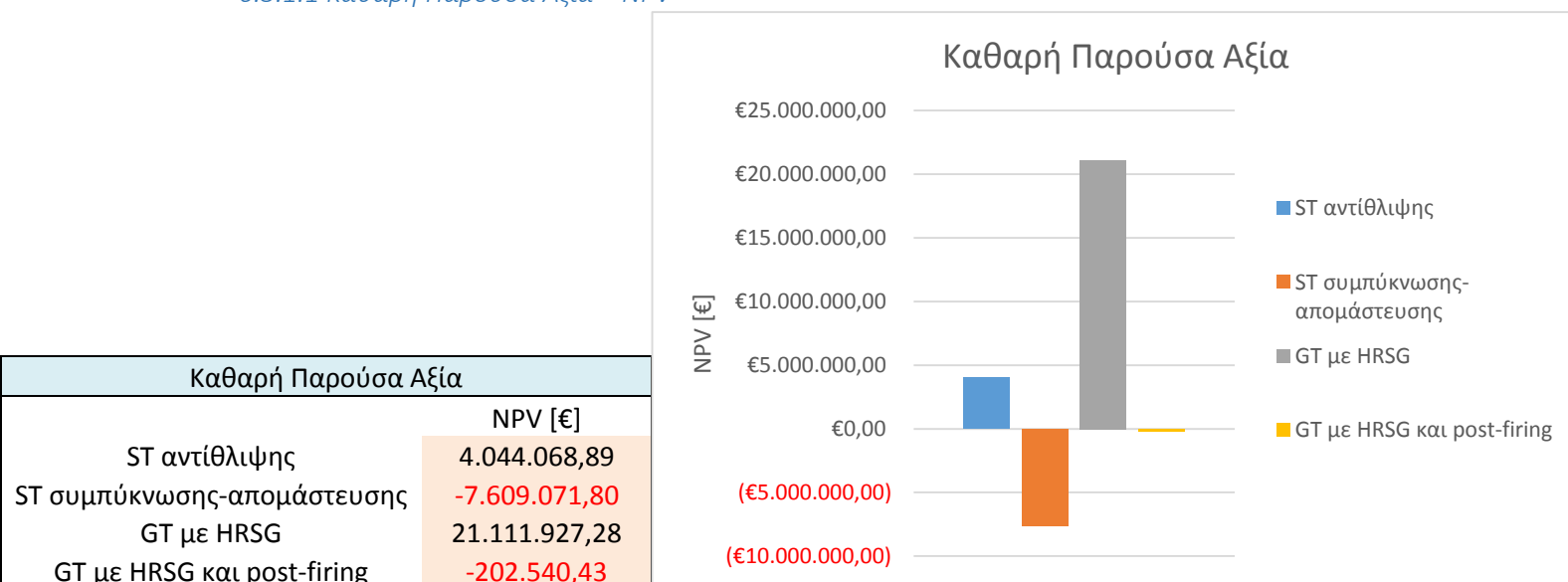
Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η αθροιστική ταμειακή ροή κάθε εγκατάστασης συναρτήσει του χρόνου. Στο διάγραμμα αυτό, μπορούμε να εντοπίσουμε και τη χρονιά κατά την οποία η επένδυσή μας αποσβένεται.



Σχήμα 6.20: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

6.3.1 Οικονομικοί Δείκτες

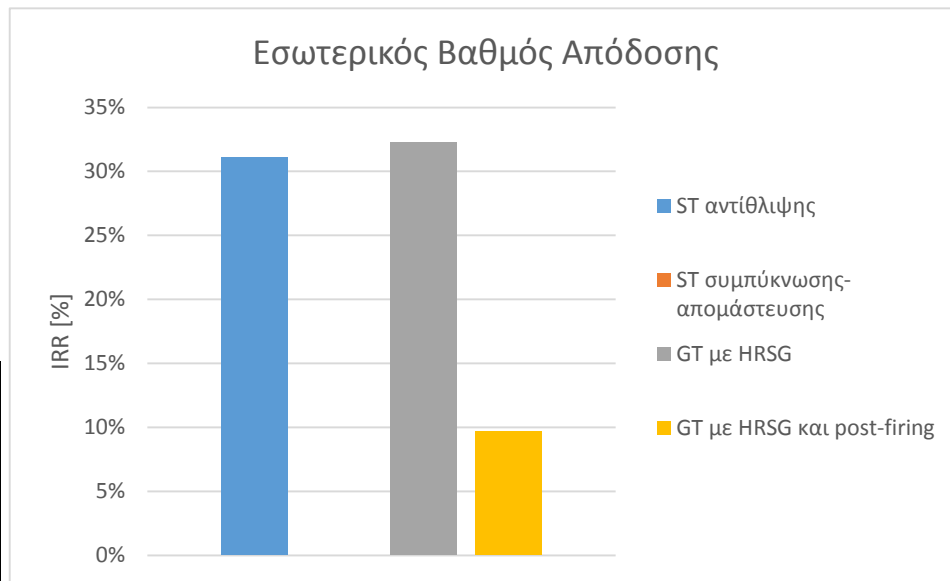
6.3.1.1 Καθαρή Παρούσα Αξία – NPV



Σχήμα 6.21: Καθαρή Παρούσα Αξία

6.3.1.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης - IRR

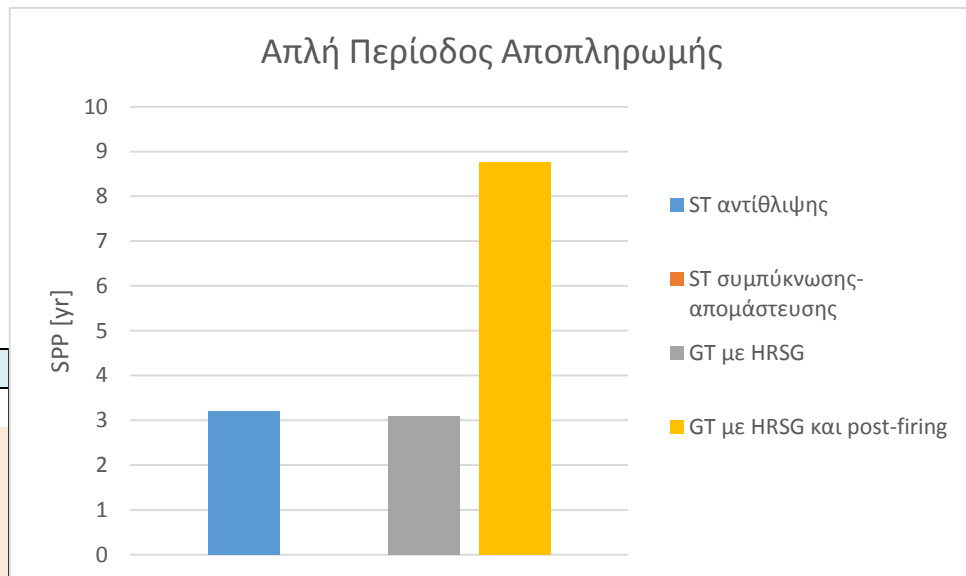
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	
	IRR [%]
ST αντίθλιψης	31%
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	-
GT με HRSG	32%
GT με HRSG και post-firing	10%



Σχήμα 6.22: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

6.3.1.3 Απλή Περίοδος Αποπληρωμής - SPP

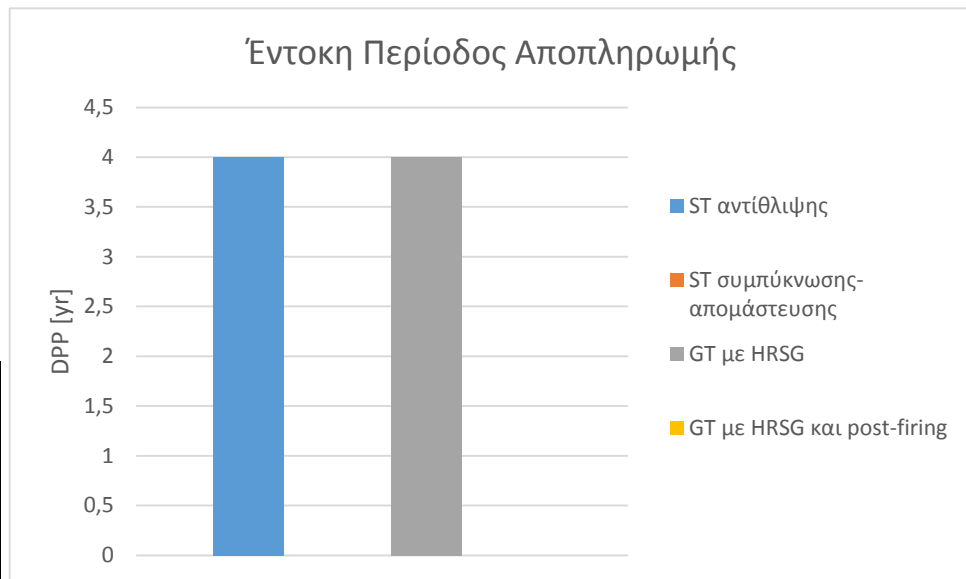
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής	
	SPP [yr]
ST αντίθλιψης	3,20
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	-
GT με HRSG	3,09
GT με HRSG και post-firing	8,75



Σχήμα 6.23: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

6.3.1.4 Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής - DPP

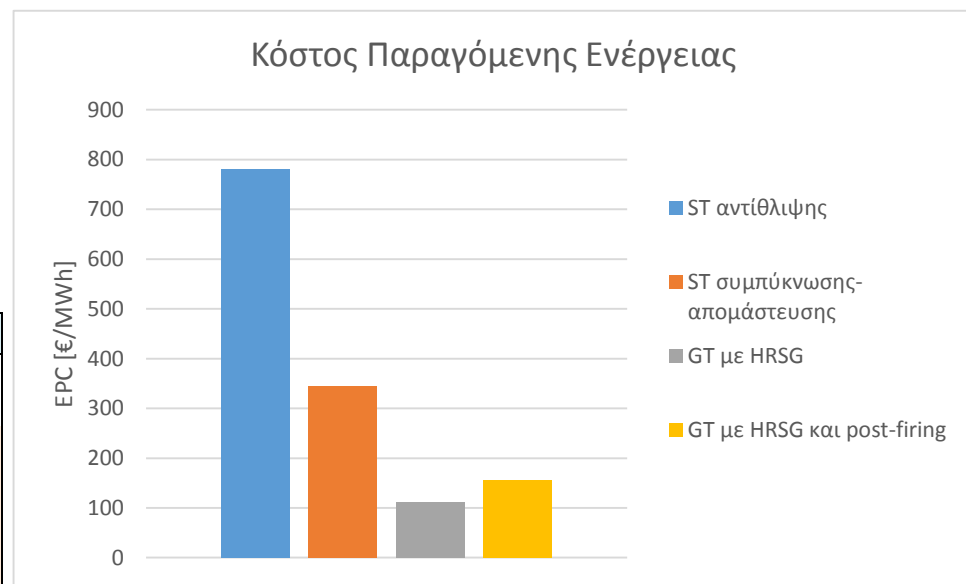
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής	
	DPP [yr]
ST αντίθλιψης	4
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	-
GT με HRSG	4
GT με HRSG και post-firing	-



Σχήμα 6.24: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

6.3.1.5 Κόστος Παραγόμενης Ενέργειας - EPC

Κόστος Παραγόμενης Ενέργειας	
	EPC [€/MWh]
ST αντίθλιψης	780,39
ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	345,14
GT με HRSG	112,26
GT με HRSG και post-firing	156,08



Σχήμα 6.25: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

6.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

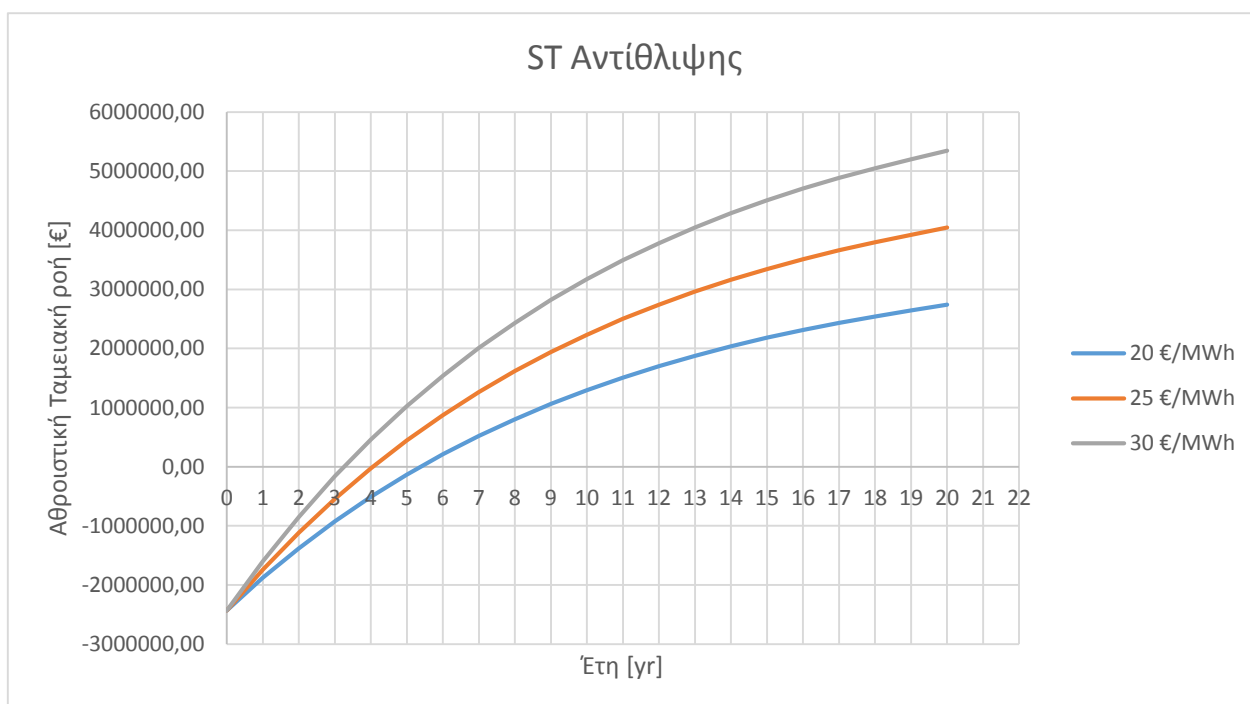
Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε ένα οικονομικό μοντέλο, ως συνέπεια των αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του. Στην παρούσα μελέτη, οι παράμετροι που μεταβάλλονται για κάθε εγκατάσταση είναι το **Κόστος Αγοράς Φυσικού Αερίου**, το **Κεφαλαιακό Κόστος**, το **Ποσοστό Δανειοδότησης**, καθώς και το **Επιτόκιο Αναγωγής**.

6.3.2.1 Κόστος Αγοράς Φυσικού Αερίου

Παρακάτω παρουσιάζεται, για κάθε σενάριο συμπαραγωγής, η Αθροιστική Ταμειακή Ροή καθώς και οι Μεταβολές των Οικονομικών Δεικτών για τις ακόλουθες Τιμές Αγοράς του Φυσικού Αερίου:

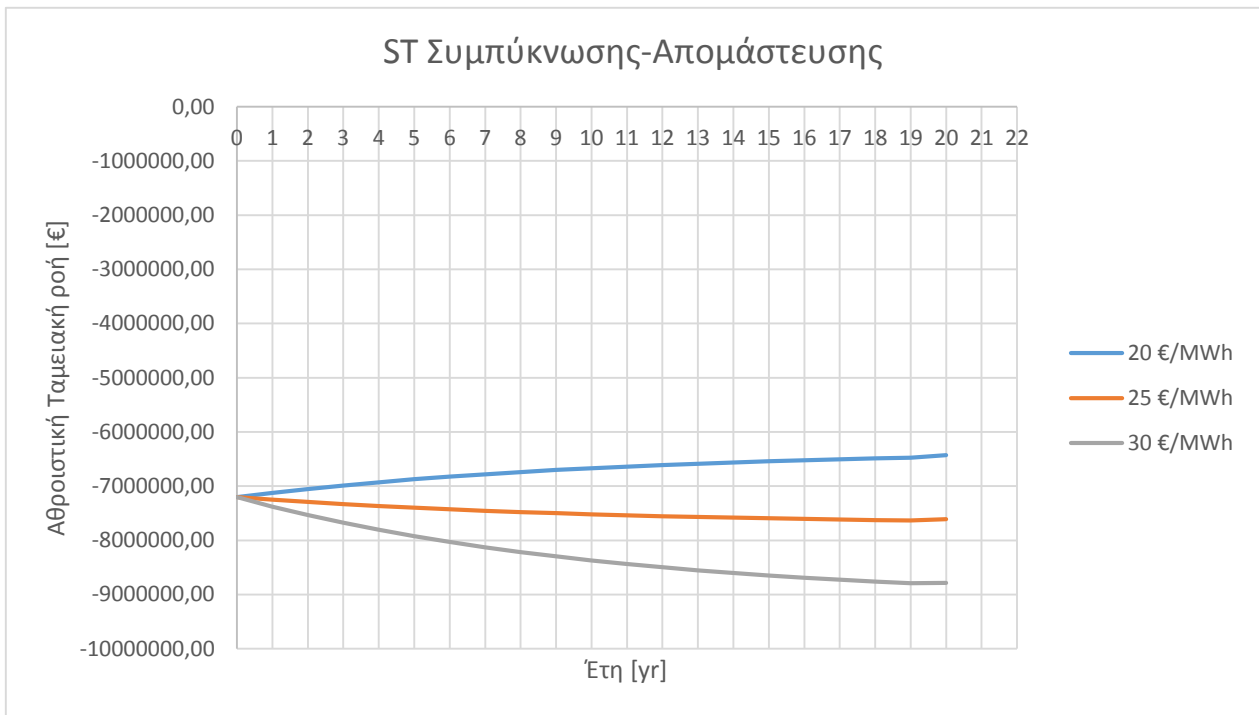
- Τιμή Αγοράς Φυσικού Αερίου: 20 €/MWh ΑΘΙ
- **Τιμή Αγοράς Φυσικού Αερίου: 25 €/MWh ΑΘΙ** (αρχικό σενάριο)
- Τιμή Αγοράς Φυσικού Αερίου: 30 €/MWh ΑΘΙ

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



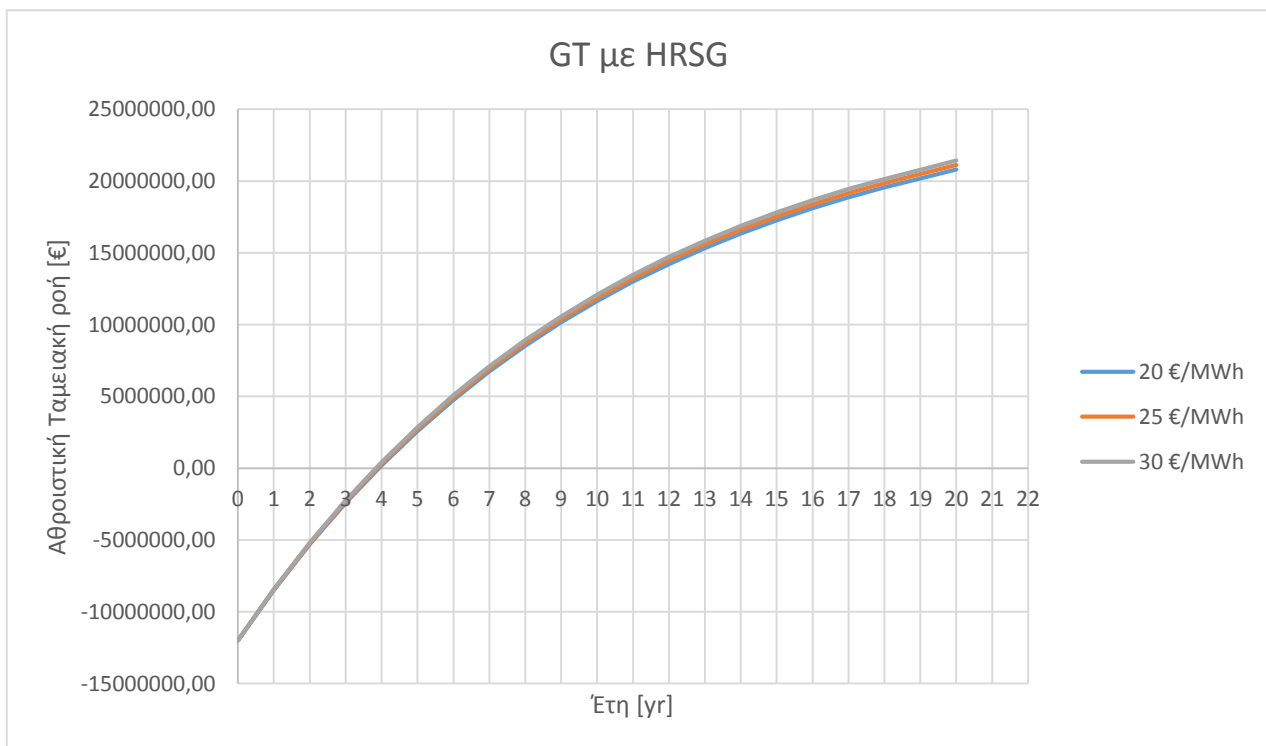
Σχήμα 6.26: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



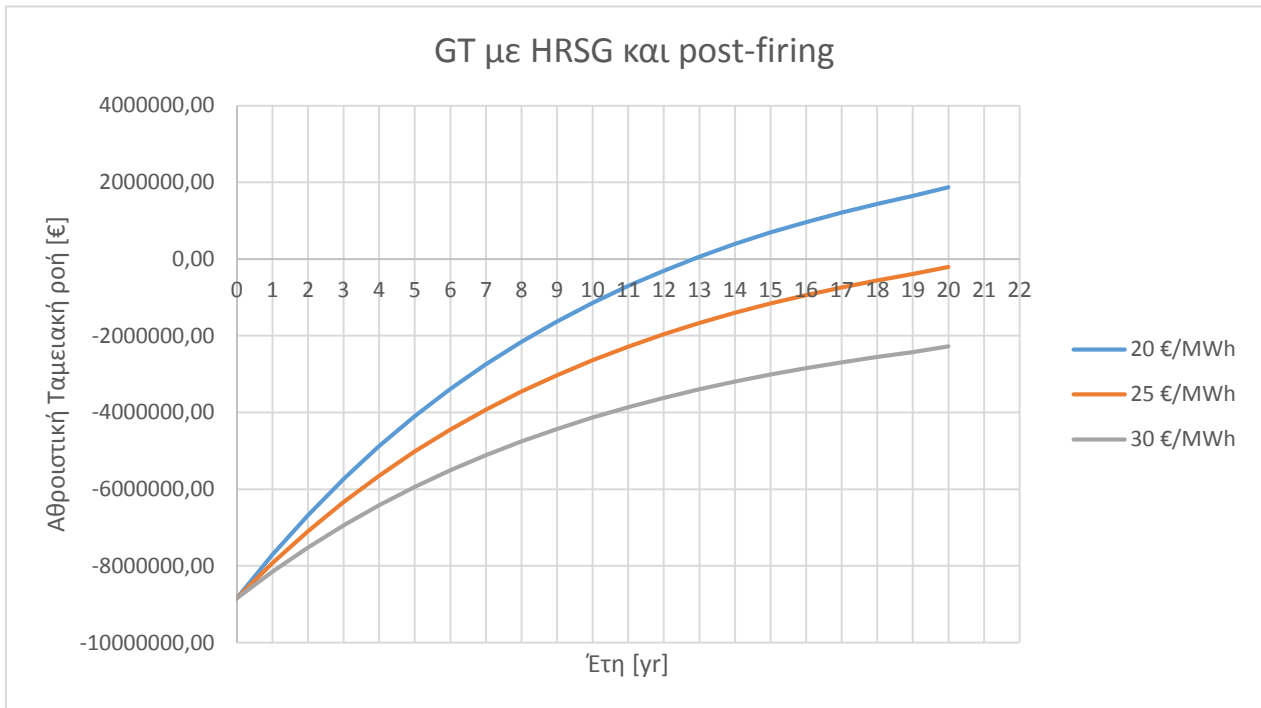
Σχήμα 6.27: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα 6.28: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

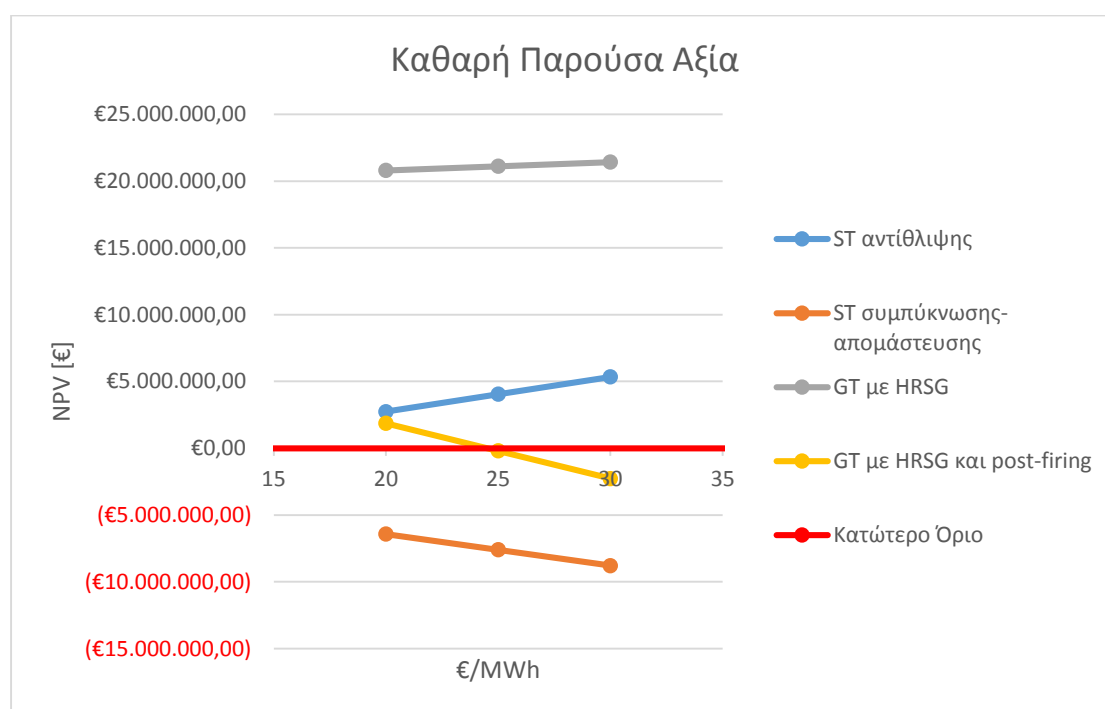


Σχήμα 6.29: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Οικονομικοί Δείκτες

Καθαρή Παρούσα Αξία

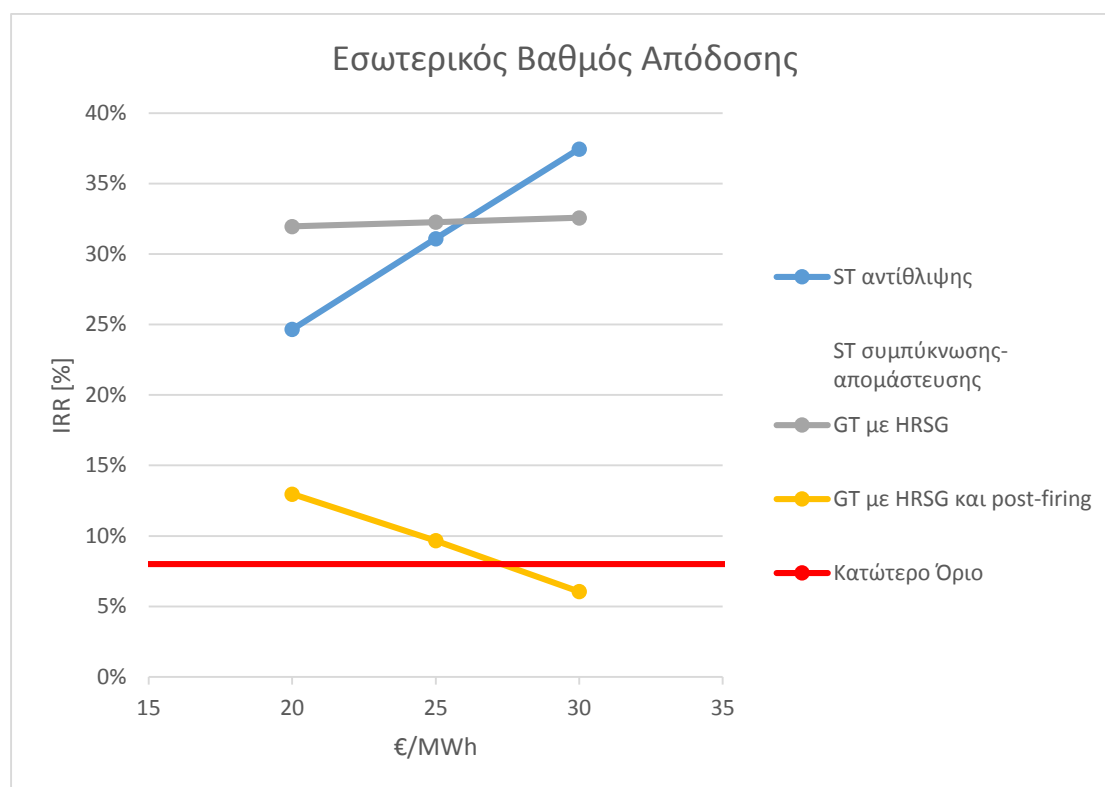
Καθαρή Παρούσα Αξία				
€/MWh	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
20	2.743.449,54 €	-6.430.645,50 €	20.803.977,35 €	1.869.326,34 €
25	4.044.068,89 €	-7.609.071,80 €	21.111.927,28 €	-202.540,43 €
30	5.344.688,24 €	-8.787.498,10 €	21.419.877,21 €	-2.274.407,20 €



Σχήμα 6.30: Καθαρή Παρούσα Αξία

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

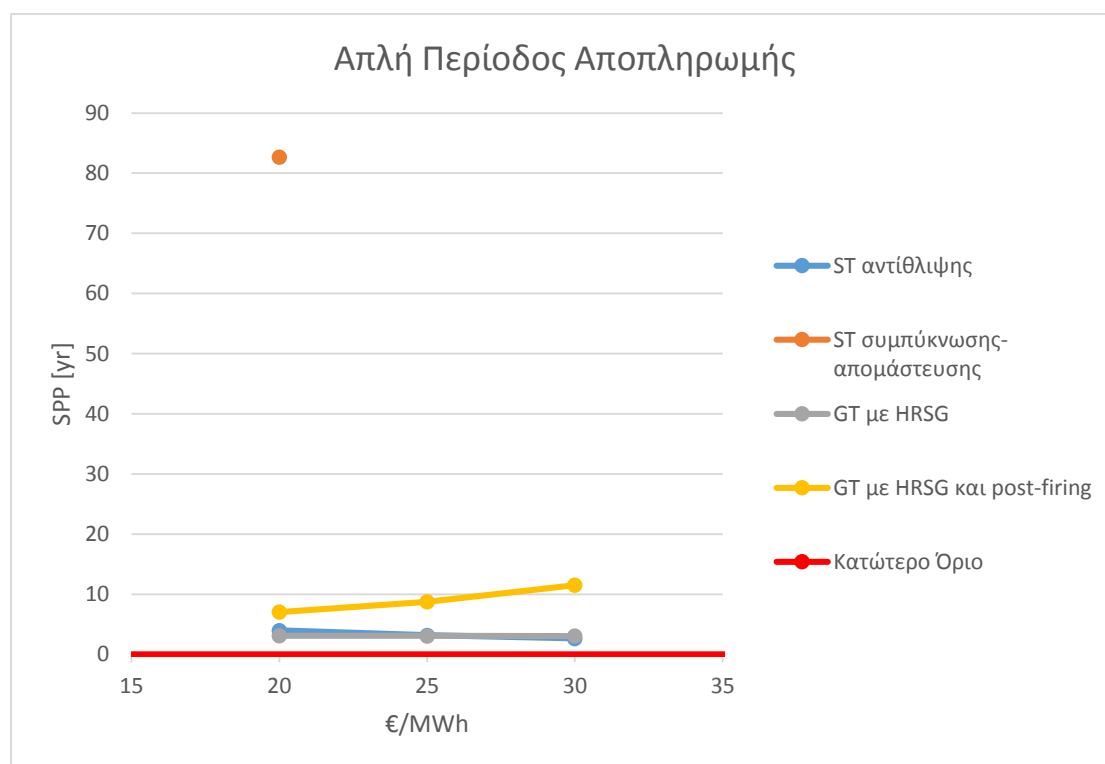
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης				
€/MWh	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
20	25%	Αρνητική Τιμή	32%	13%
25	31%	-	32%	10%
30	37%	-	33%	6%



Σχήμα 6.31: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

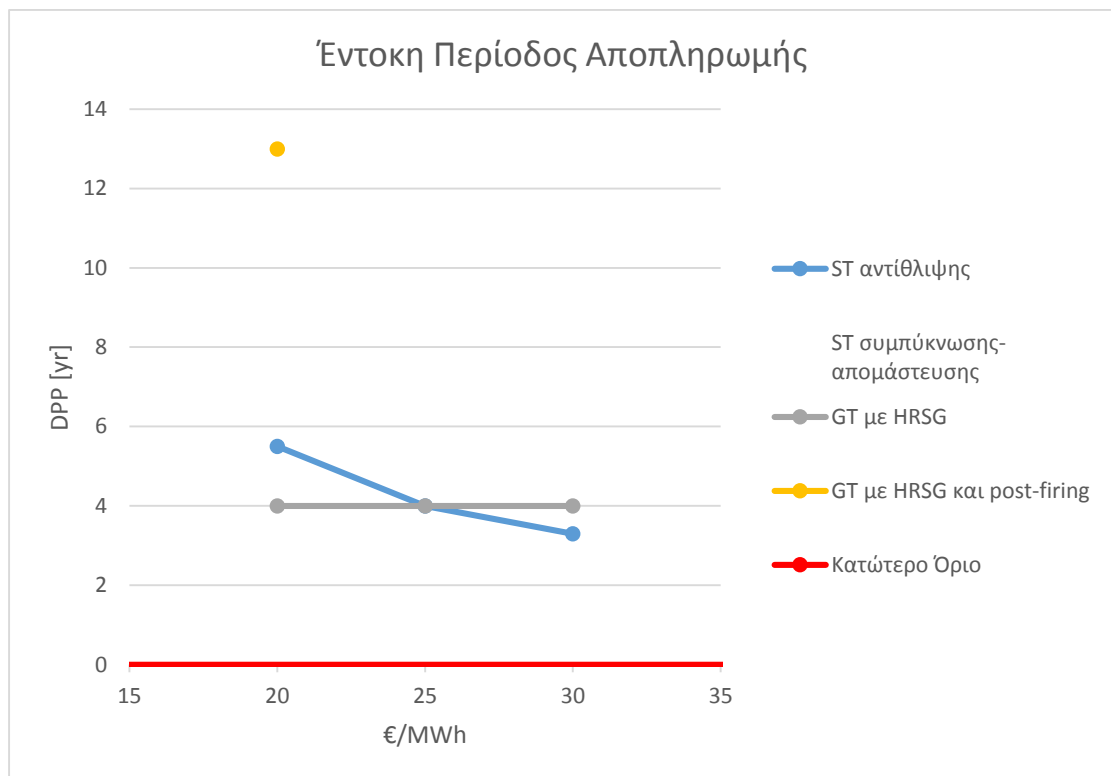
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής				
€/MWh	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
20	4,01	82,68	3,12	7,05
25	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75
30	2,67	Αρνητική Τιμή	3,06	11,53



Σχήμα 6.32: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

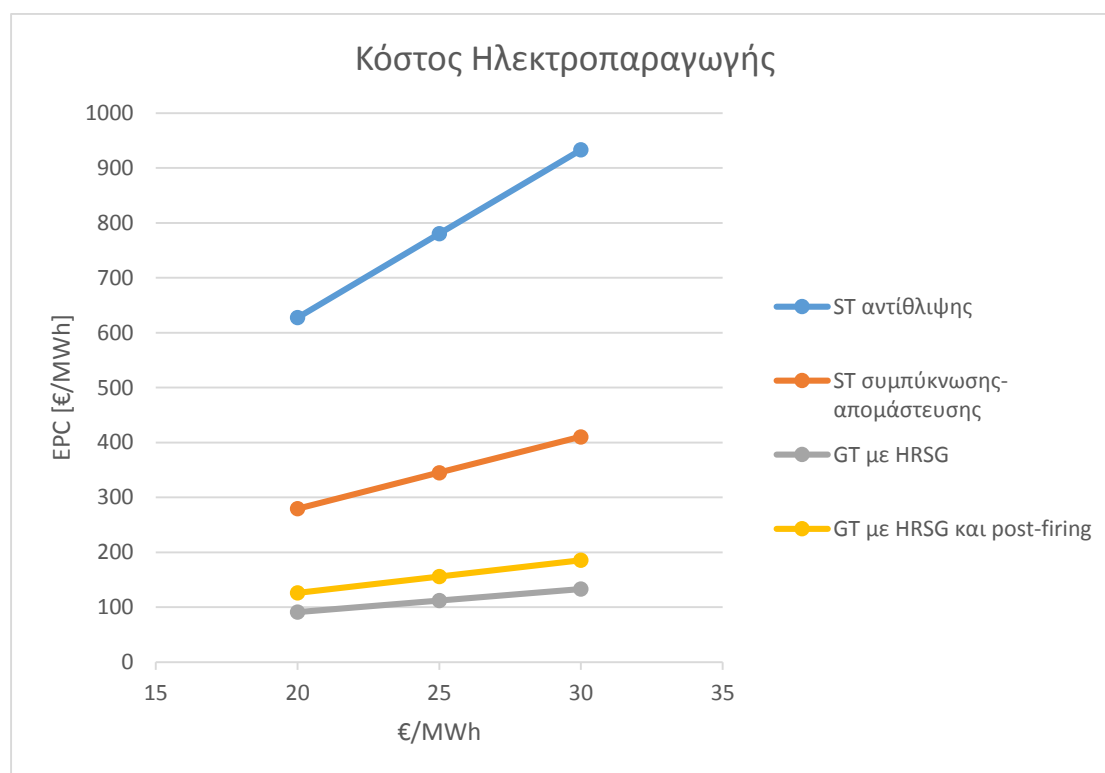
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής					
€/MWh	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing	
20	5,5	-	4	13	
25	4	-	4	-	
30	3,3	-	4	-	



Σχήμα 6.33: Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής					
€/MWh	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing	
20	627,78	279,76	91,24	126,44	
25	780,39	345,14	112,26	156,08	
30	933	410,51	133,28	185,72	



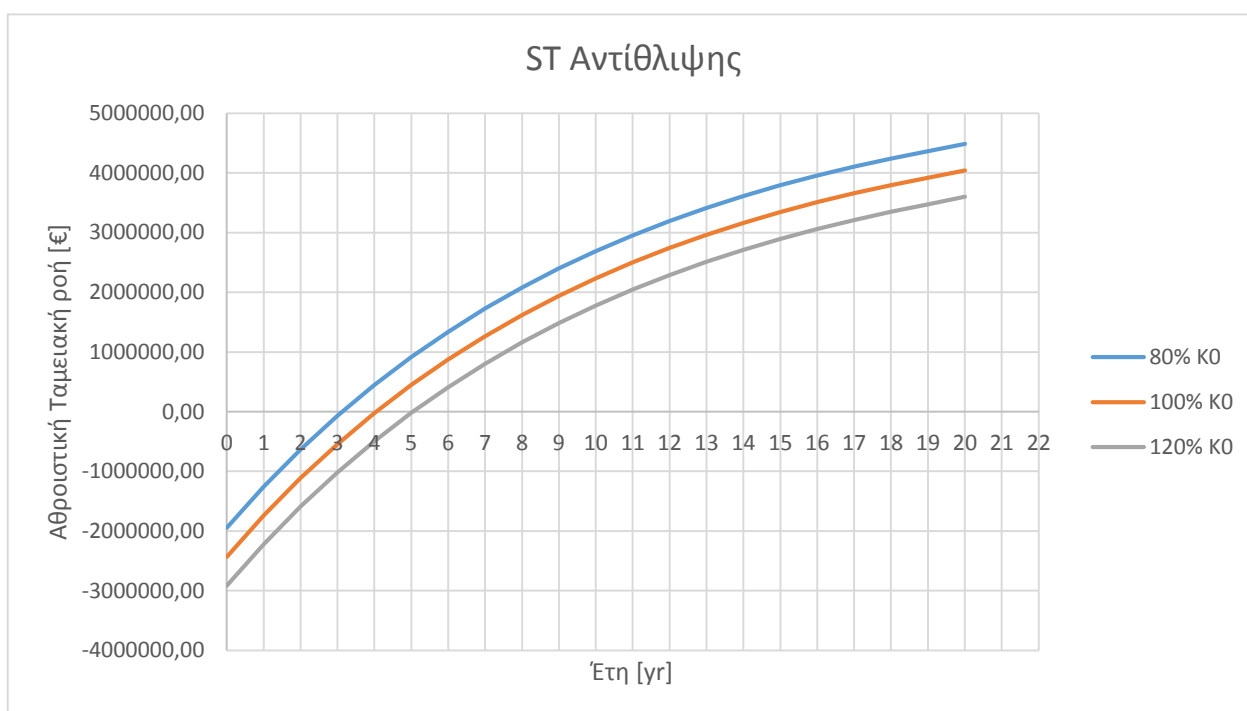
Σχήμα 6.34: Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

6.3.2.2 Κεφαλαιακό Κόστος

Παρακάτω παρουσιάζεται, για κάθε σενάριο συμπαραγωγής, η Αθροιστική Ταμειακή Ροή καθώς και οι Μεταβολές των Οικονομικών Δεικτών για τις ακόλουθες Κεφαλαιακές μεταβολές:

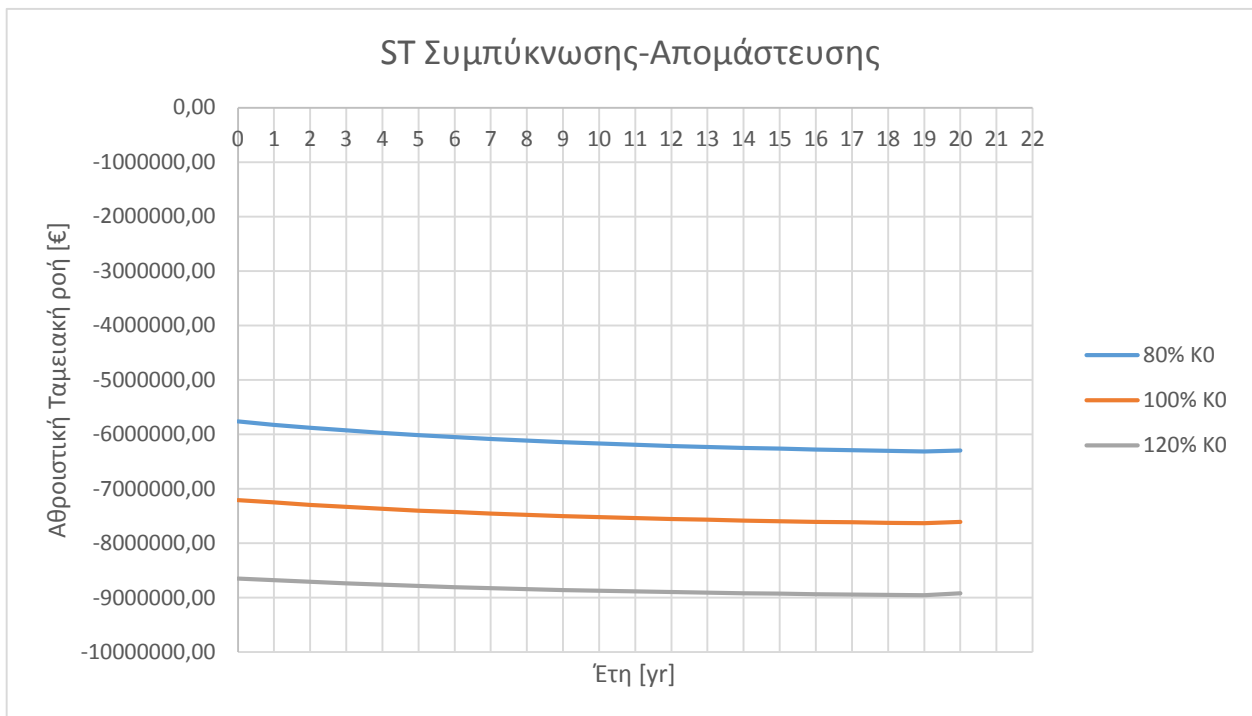
- Κεφαλαιακό Κόστος: 80% του υπολογιζόμενου K_0
- **Κεφαλαιακό Κόστος: Το υπολογιζόμενο K_0** (αρχικό σενάριο)
- Κεφαλαιακό Κόστος: 120% του υπολογιζόμενου K_0

Σενάριο Συμπαραγωγής A - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



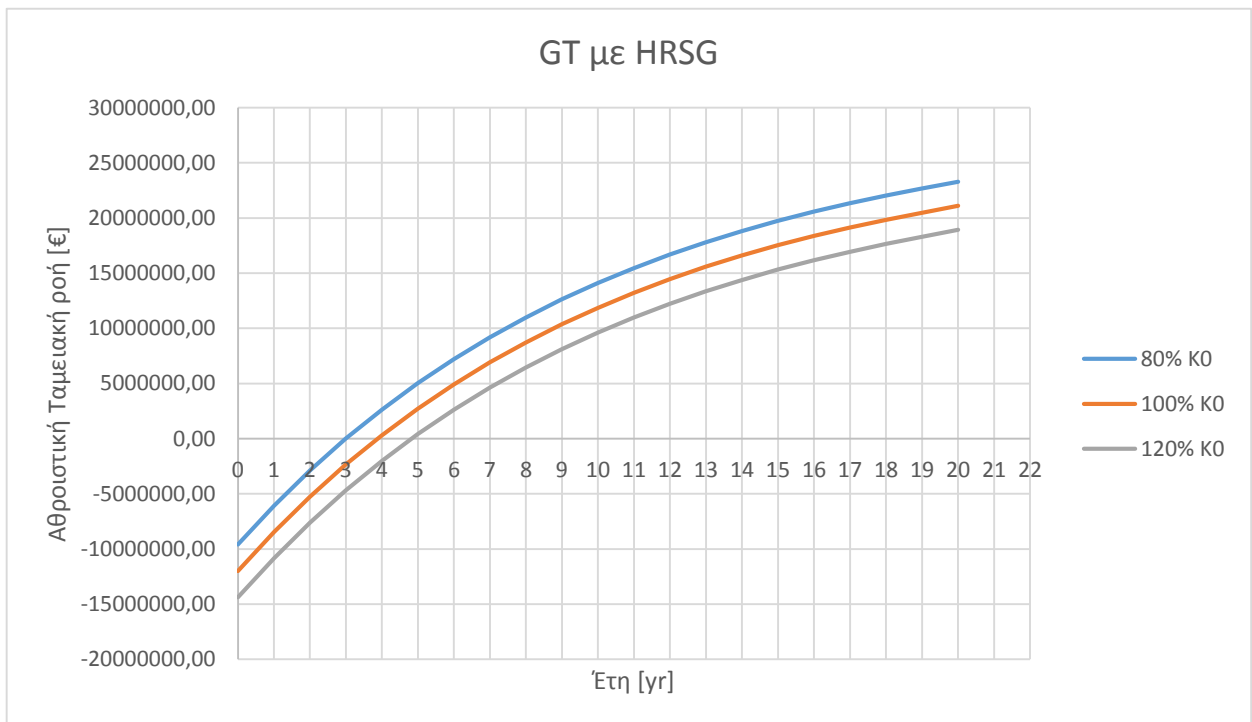
Σχήμα 6.35: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



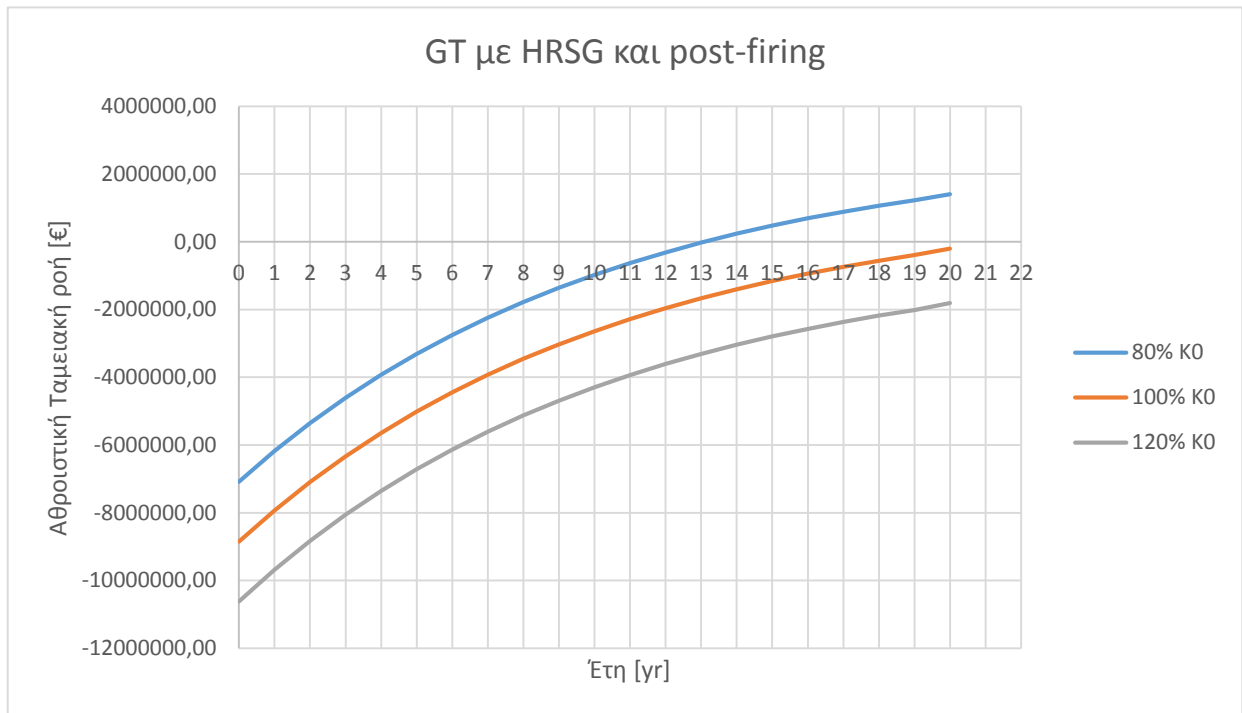
Σχήμα 6.36: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα 6.37: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

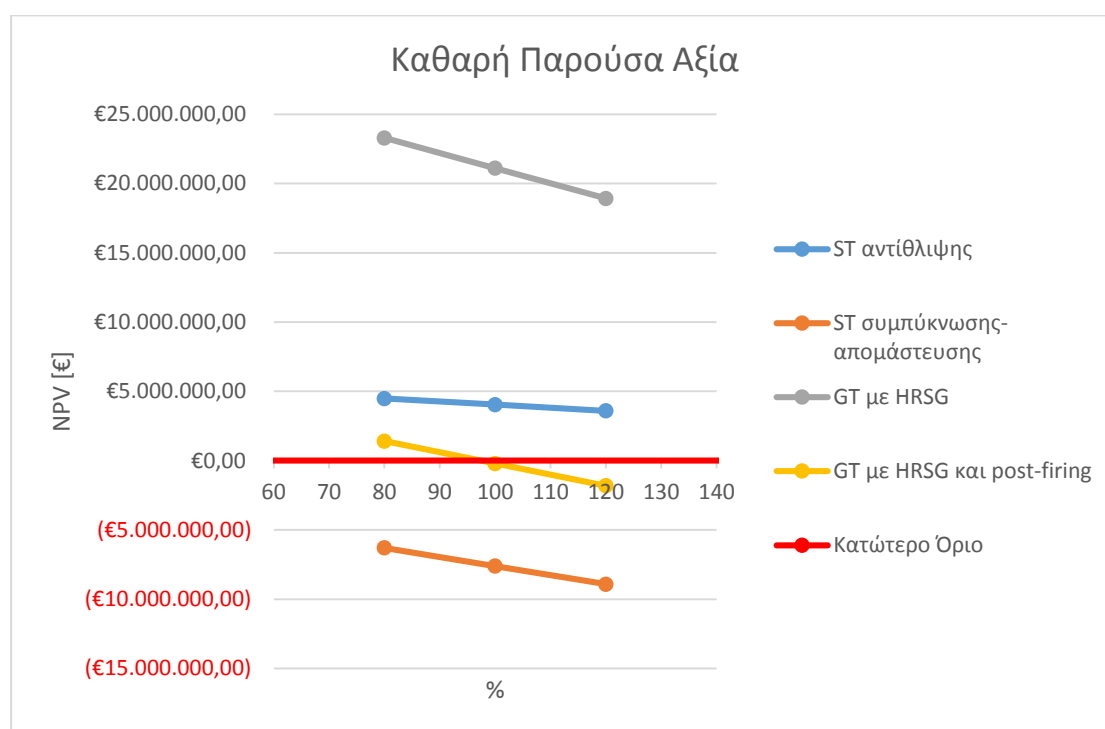


Σχήμα 6.38: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Οικονομικοί Δείκτες

Καθαρή Παρούσα Αξία

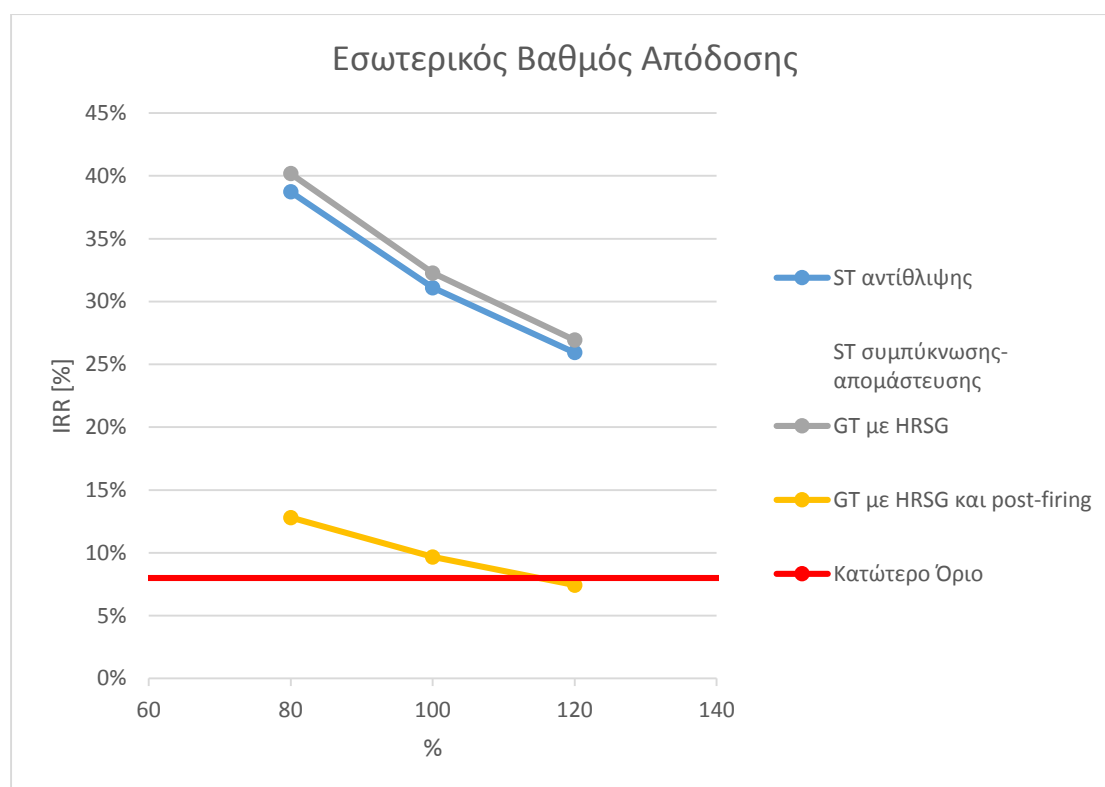
Καθαρή Παρούσα Αξία				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
80	4.486.810,21 €	-6.297.235,96 €	23.294.168,19 €	1.408.485,04 €
100	4.044.068,89 €	-7.609.071,80 €	21.111.927,28 €	-202.540,43 €
120	3.601.327,56 €	-8.920.907,64 €	18.929.686,36 €	-1.813.565,90 €



Σχήμα 6.39: Καθαρή Παρούσα Αξία

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

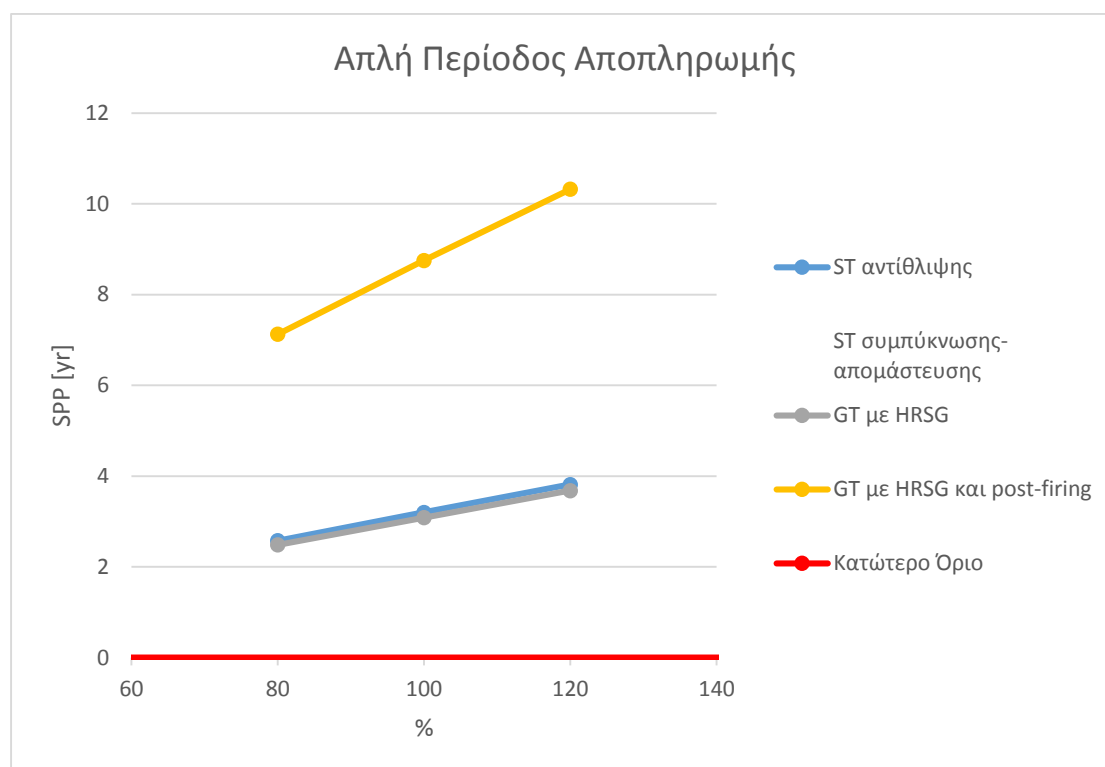
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
80	39%	-	40%	13%
100	31%	-	32%	10%
120	26%	-	27%	7%



Σχήμα 6.40: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

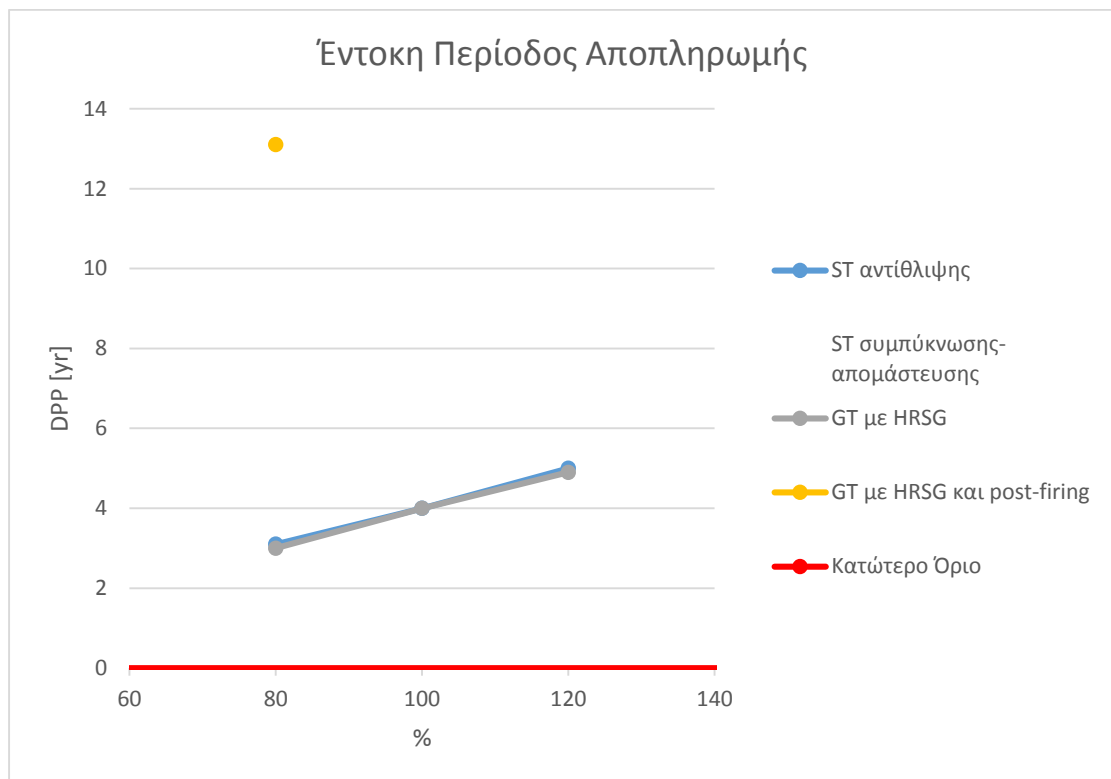
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
80	2,58	Αρνητική Τιμή	2,49	7,13
100	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75
120	3,82	Αρνητική Τιμή	3,68	10,32



Σχήμα 6.41: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

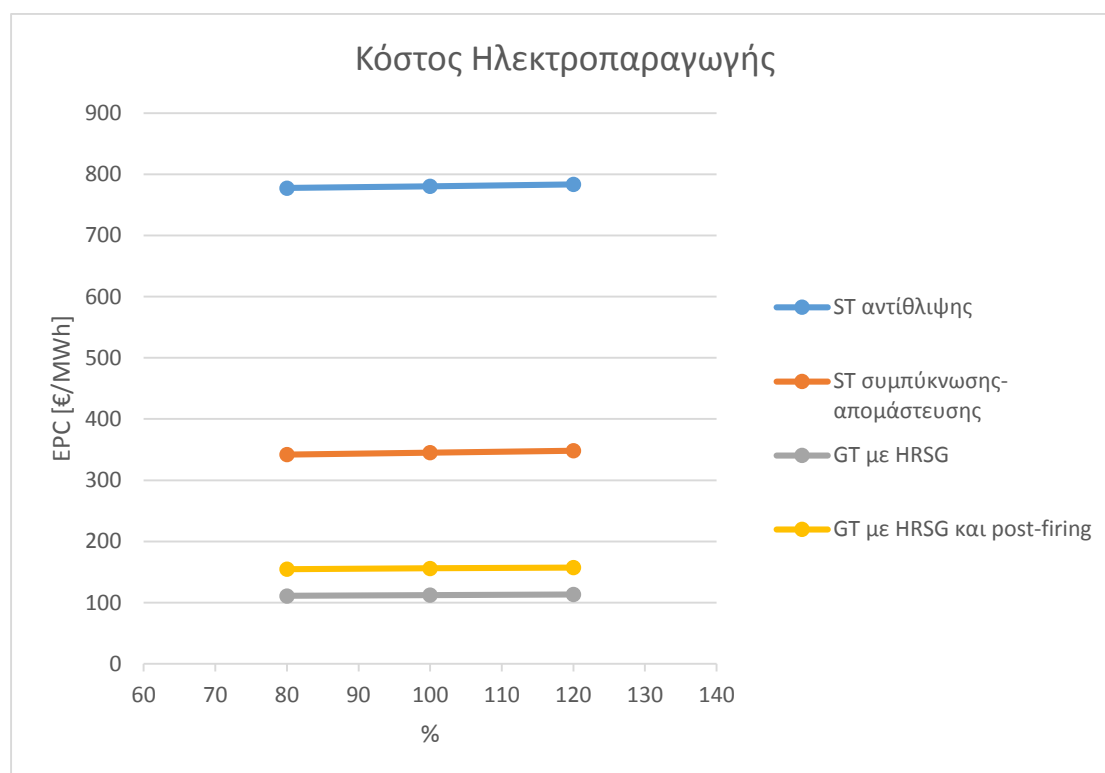
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής					
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing	
80	3,1	-	3	13,1	
100	4	-	4	-	
120	5	-	4,9	-	



Σχήμα 6.42: Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
80	777,39	342,05	111,06	154,76
100	780,39	345,14	112,26	156,08
120	783,39	348,22	113,46	157,40



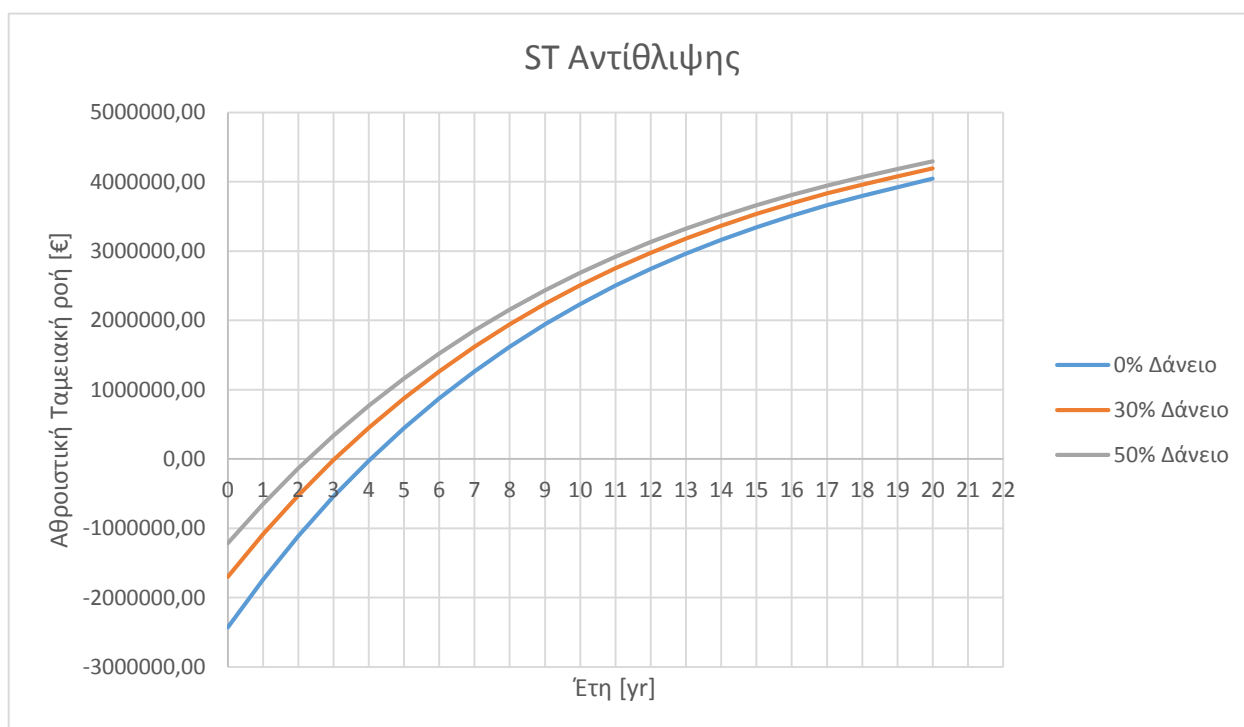
Σχήμα 6.43: Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

6.3.2.3 Δάνειο

Παρακάτω παρουσιάζεται, για κάθε σενάριο συμπαραγωγής, η Αθροιστική Ταμειακή Ροή καθώς και οι Μεταβολές των Οικονομικών Δεικτών για τα ακόλουθα Ποσοστά Δανειοδότησης:

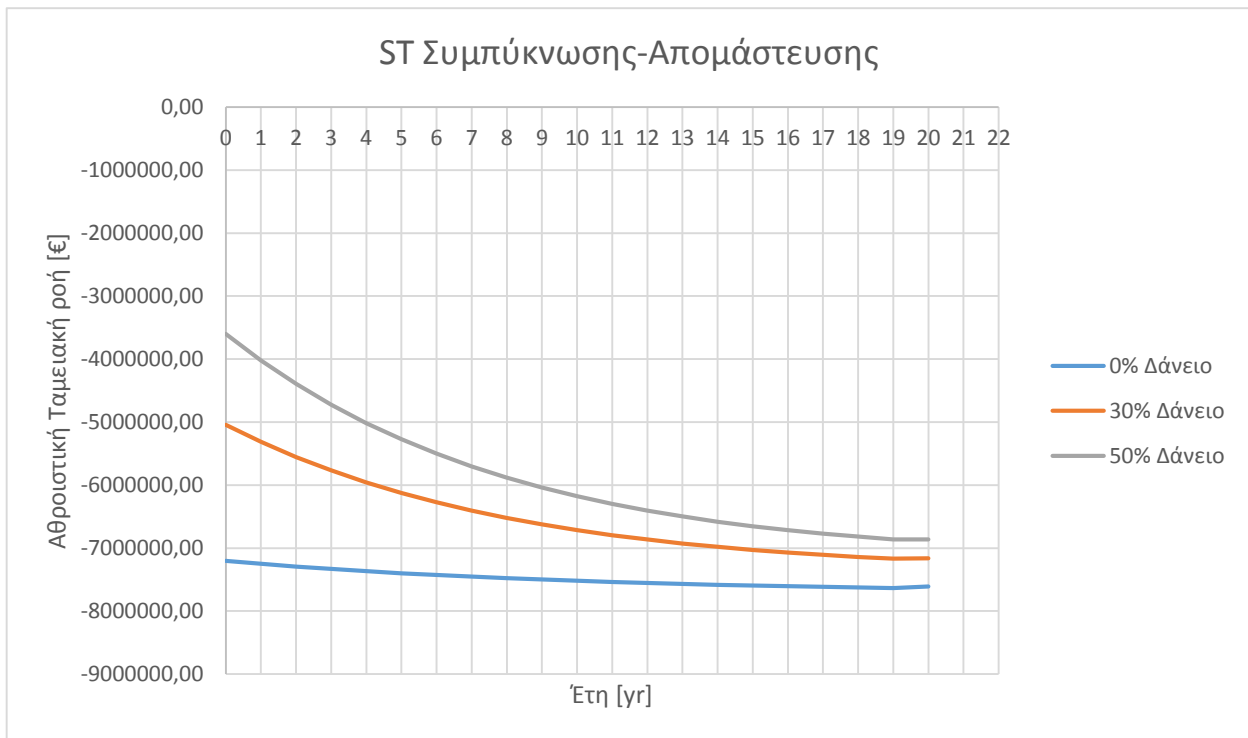
- **Ποσοστό Δανειοδότησης: 0%** (αρχικό σενάριο)
- Ποσοστό Δανειοδότησης: 30%
- Ποσοστό Δανειοδότησης: 50%

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



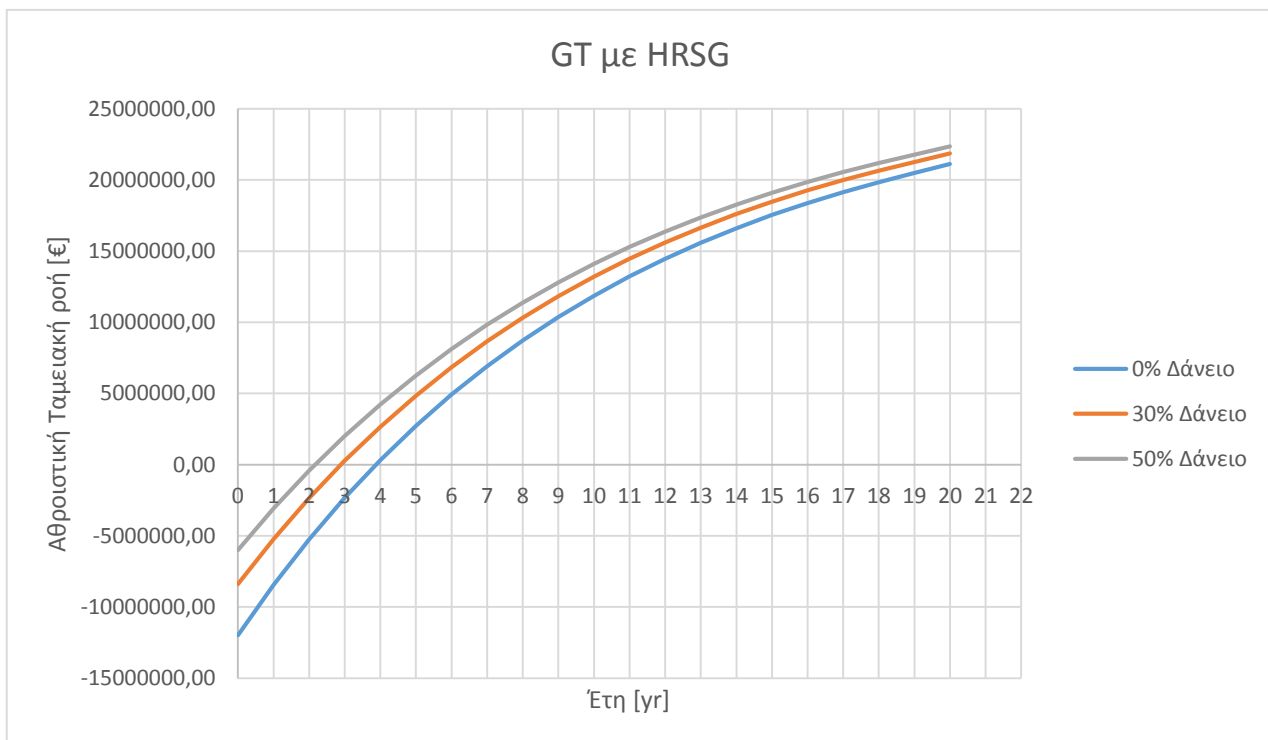
Σχήμα 6.44: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



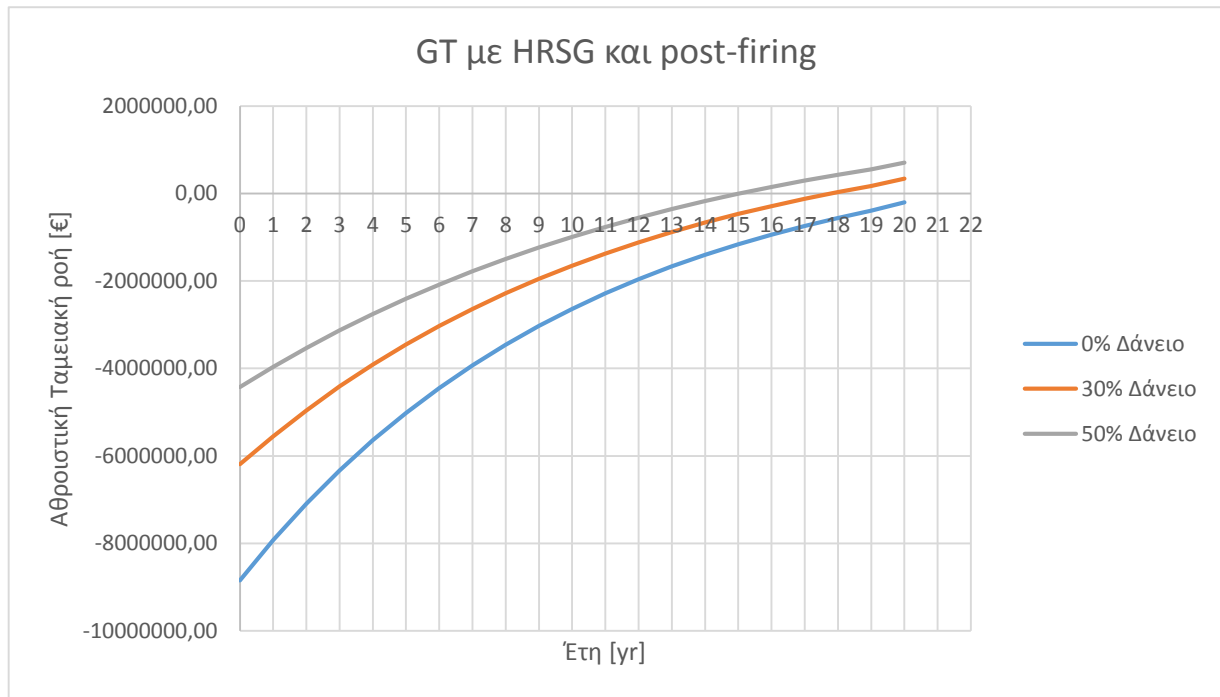
Σχήμα 6.45: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα 6.46: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση

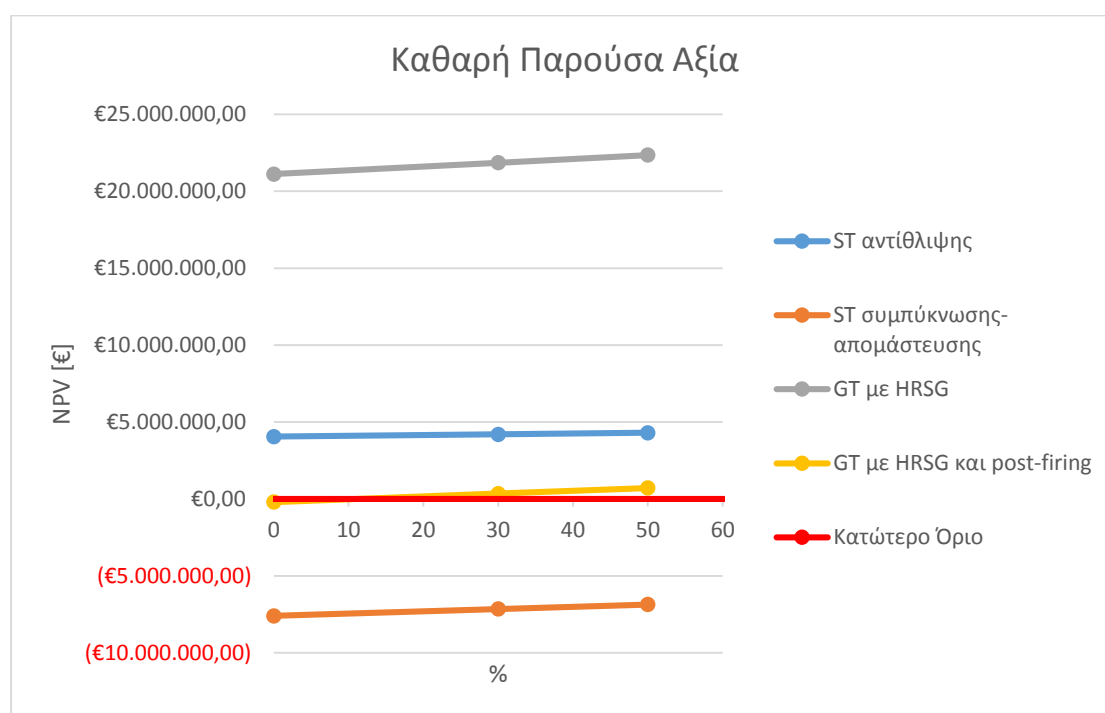


Σχήμα 6.47: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Οικονομικοί Δείκτες

Καθαρή Παρούσα Αξία

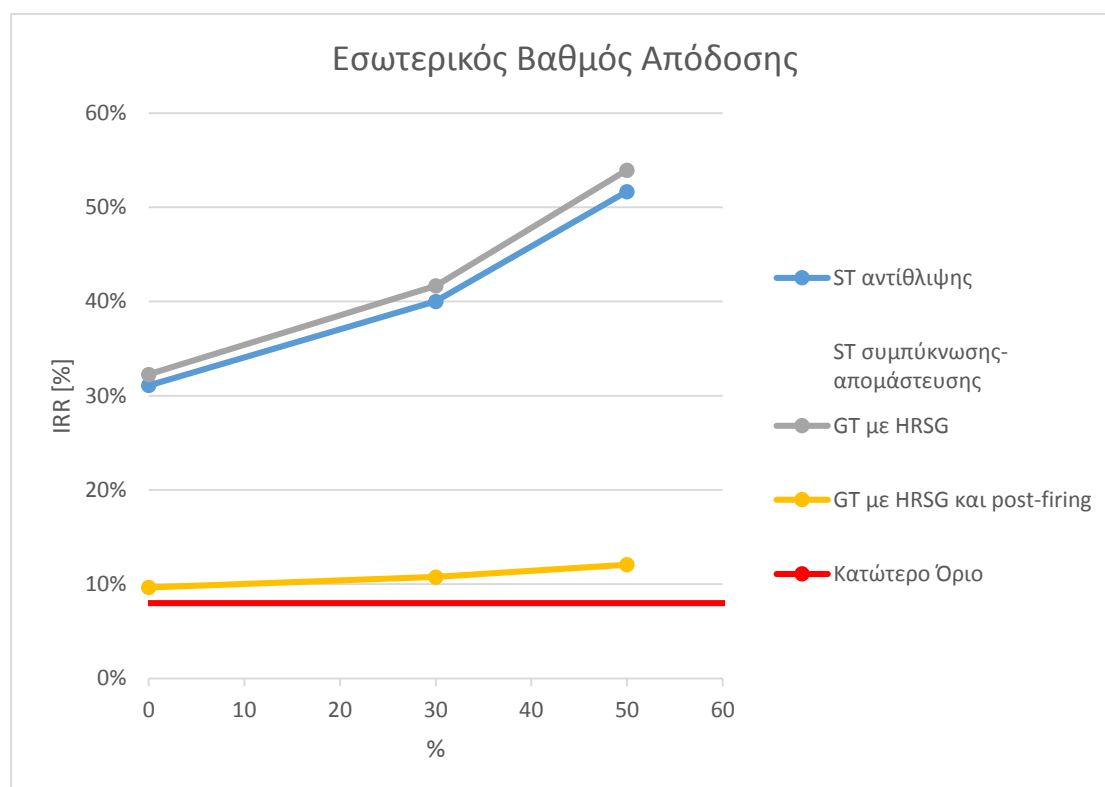
Καθαρή Παρούσα Αξία				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
0	4.044.068,89 €	-7.609.071,80 €	21.111.927,28 €	-202.540,43 €
30	4.194.890,81 €	-7.162.188,73 €	21.855.317,95 €	346.263,00 €
50	4.295.438,76 €	-6.864.266,68 €	22.350.911,73 €	712.131,96 €



Σχήμα 6.48: Καθαρή Παρούσα Αξία

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

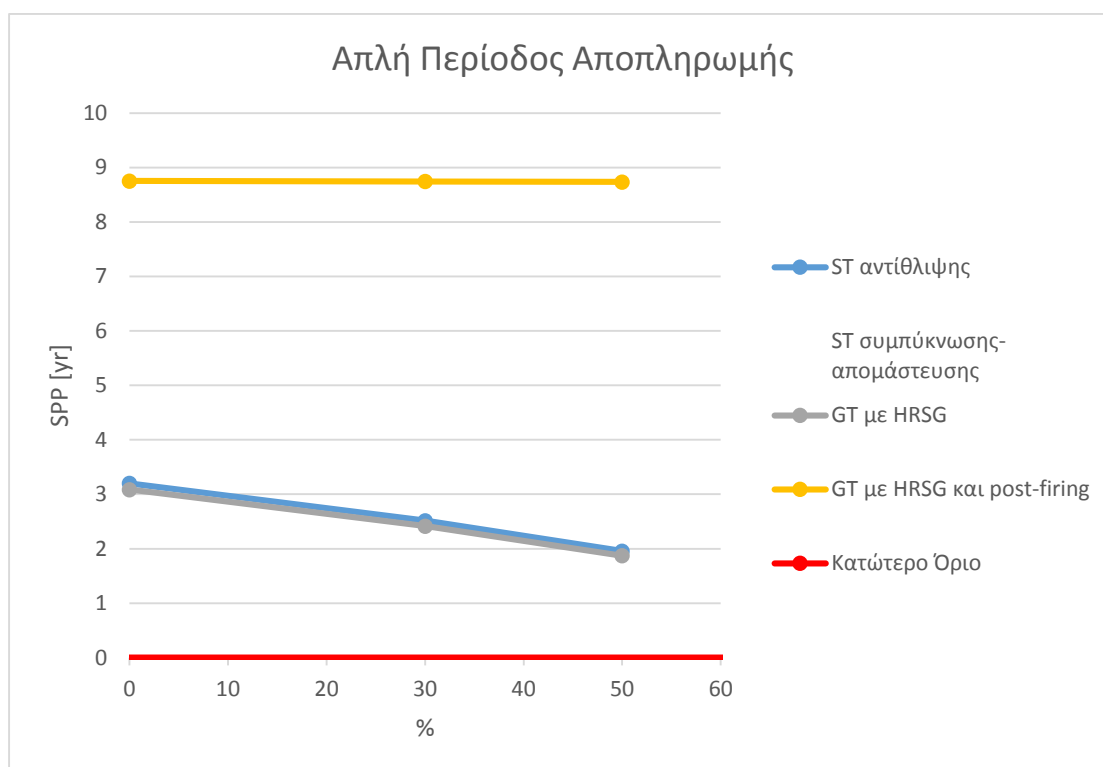
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
0	31%	-	32%	10%
30	40%	-	42%	11%
50	52%	-	54%	12%



Σχήμα 6.49: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

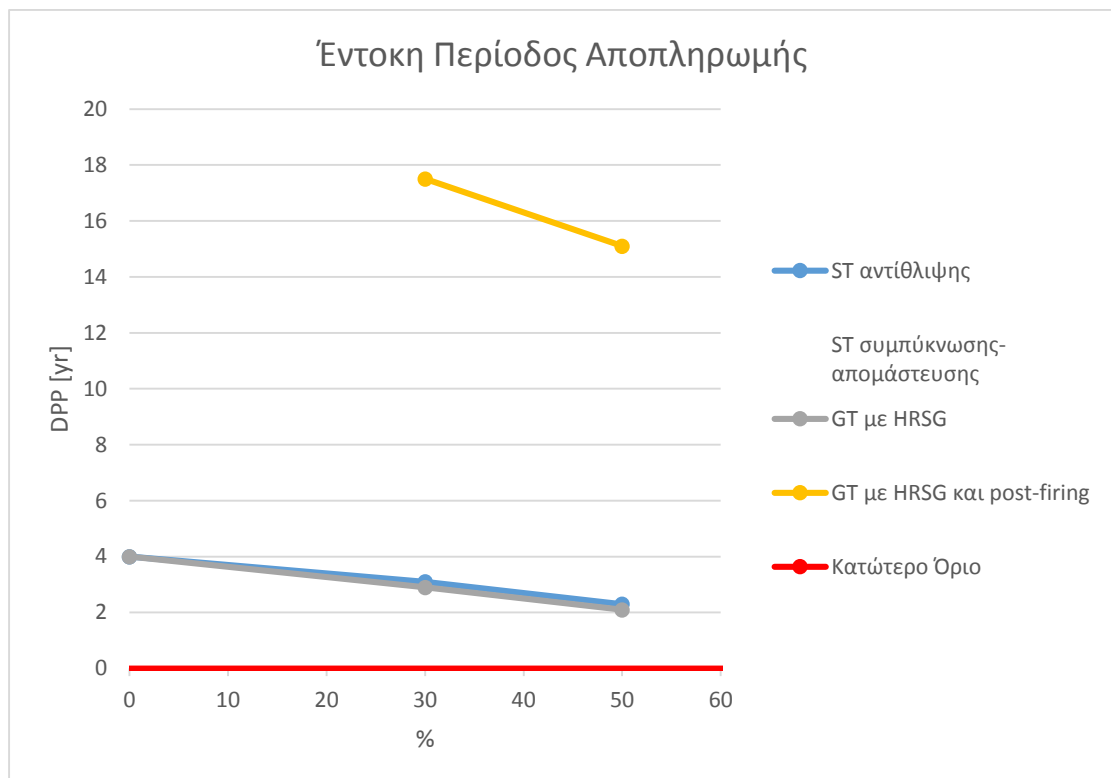
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
0	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75
30	2,52	Αρνητική Τιμή	2,42	8,74
50	1,96	Αρνητική Τιμή	1,87	8,73



Σχήμα 6.50: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

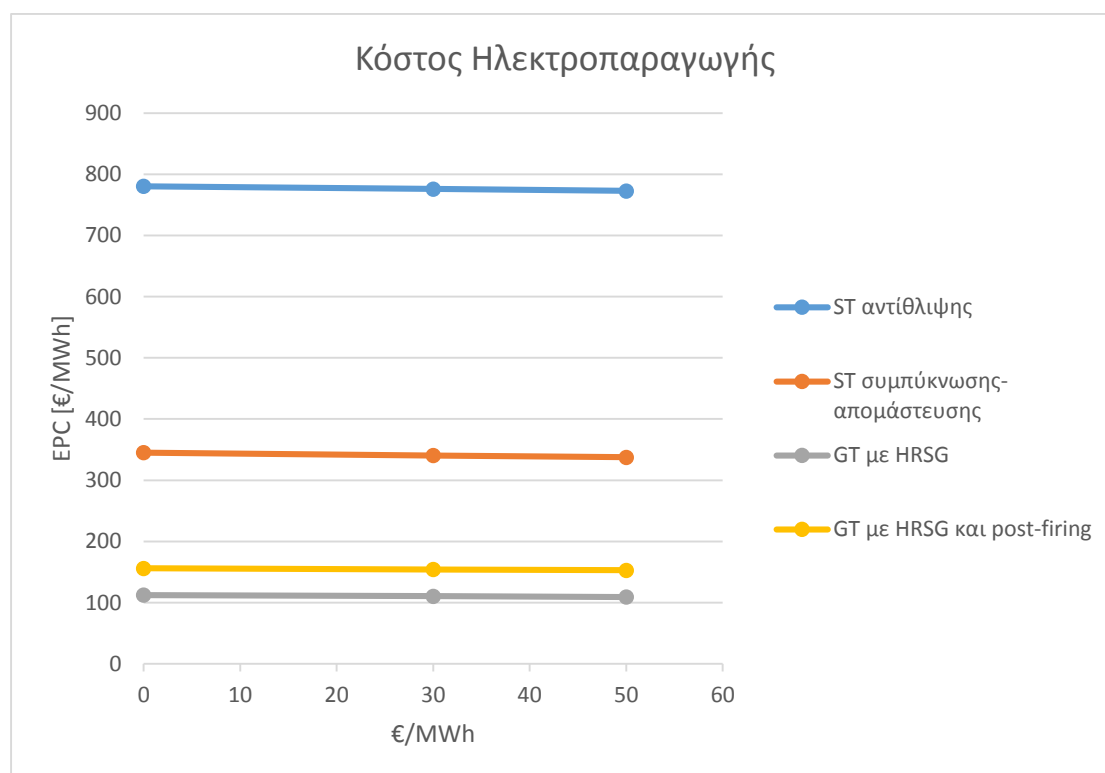
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
0	4	-	4	-
30	3,1	-	2,9	17,5
50	2,3	-	2,1	15,1



Σχήμα 6.51: Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
0	780,39	345,14	112,26	156,08
30	775,89	340,51	110,46	154,10
50	772,89	337,42	109,26	152,78



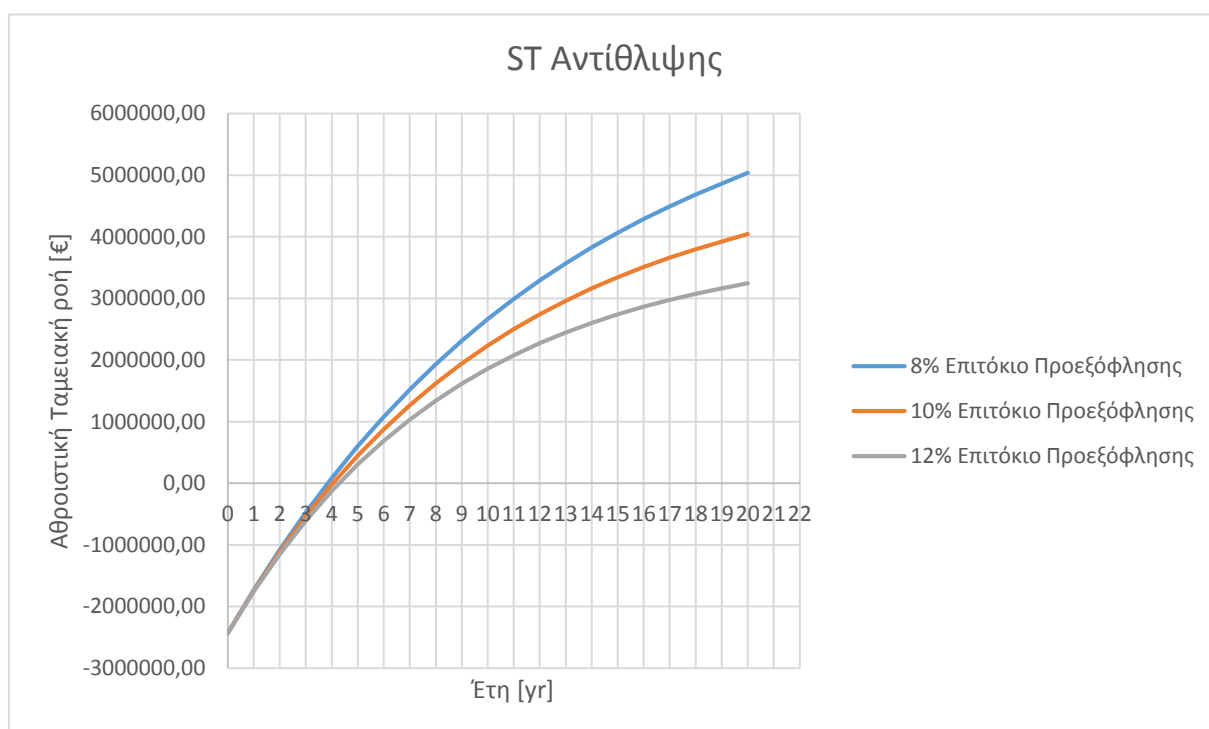
Σχήμα 6.52: Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

6.3.2.4 Επιτόκιο Αναγωγής

Παρακάτω παρουσιάζεται, για κάθε σενάριο συμπαραγωγής, η Αθροιστική Ταμειακή Ροή καθώς και οι Μεταβολές των Οικονομικών Δεικτών για τα ακόλουθα Επιτόκια Αναγωγής:

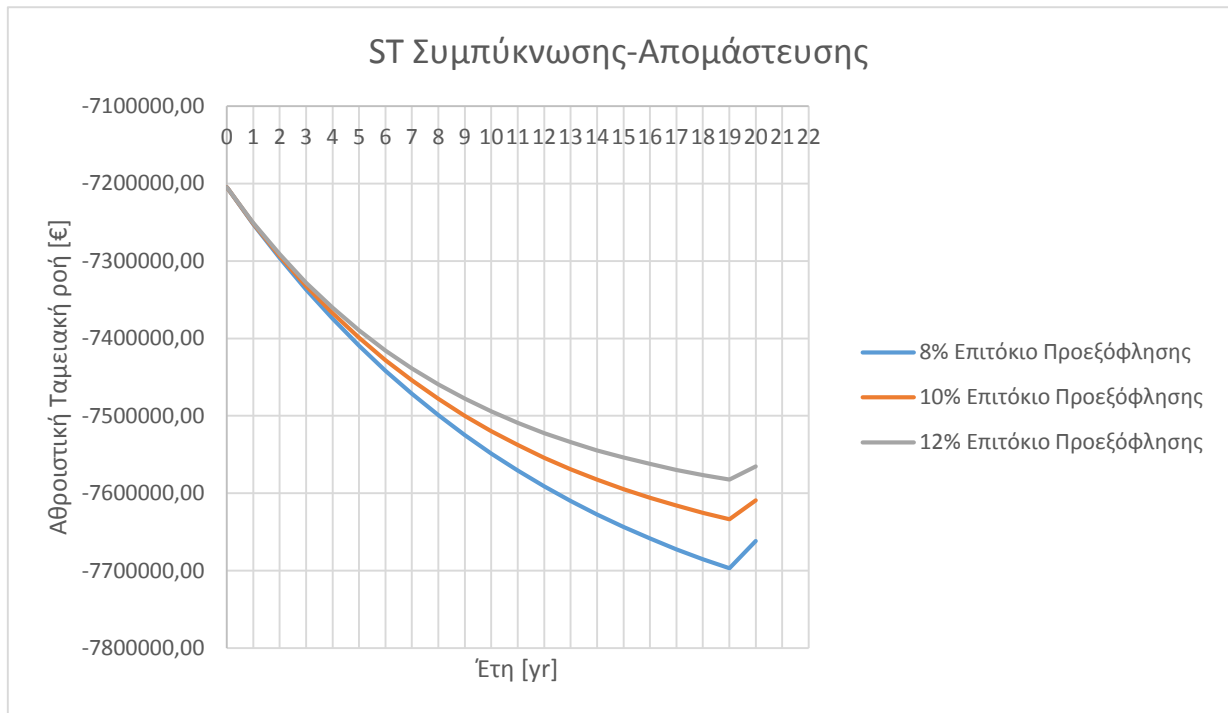
- Επιτόκιο Αναγωγής: 8%
- **Επιτόκιο Αναγωγής: 10%** (αρχικό σενάριο)
- Επιτόκιο Αναγωγής: 12%

Σενάριο Συμπαραγωγής Α - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



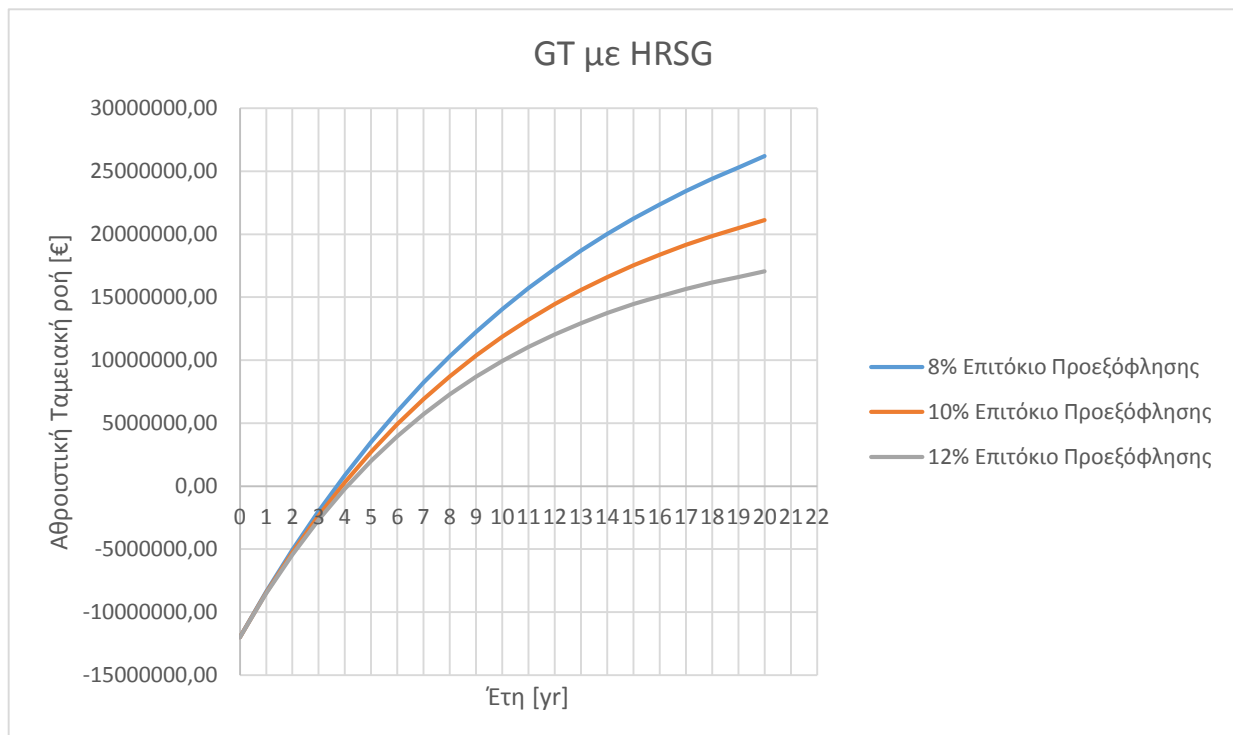
Σχήμα 6.53: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



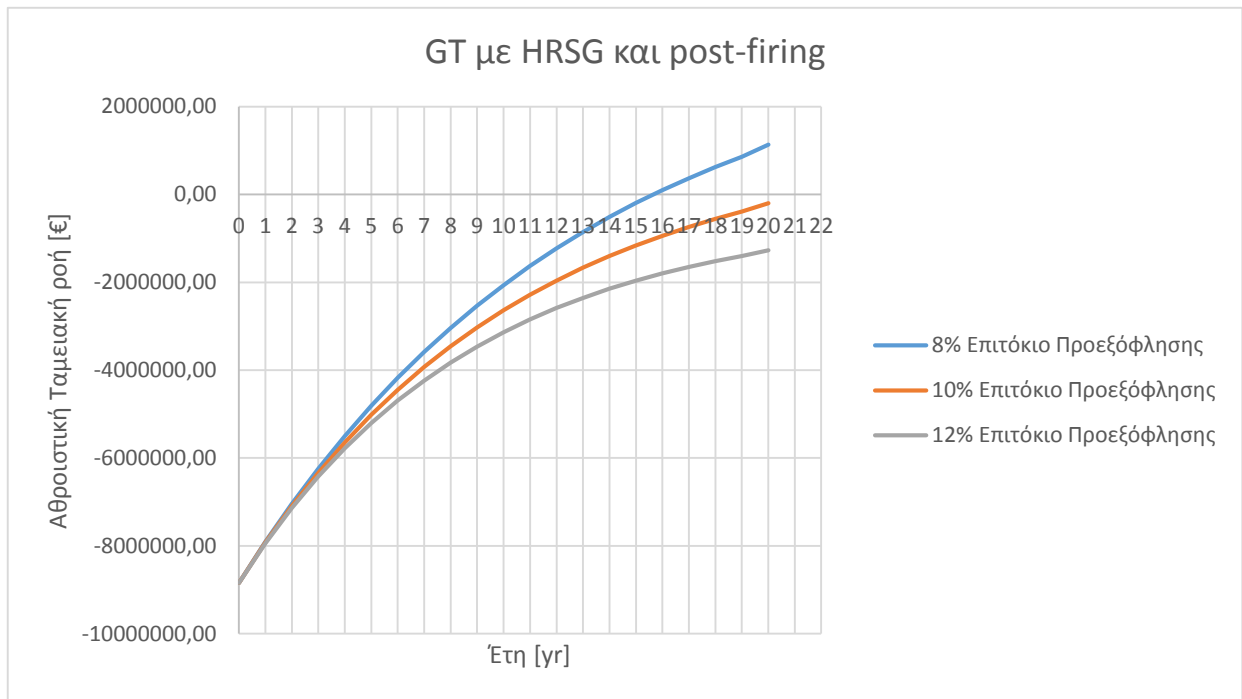
Σχήμα 6.54: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα 6.55: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Σενάριο Συμπαραγωγής Δ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας και Επιπλέον Καύση



Σχήμα 6.56: Αθροιστική Ταμειακή Ροή

Οικονομικοί Δείκτες

Καθαρή Παρούσα Αξία

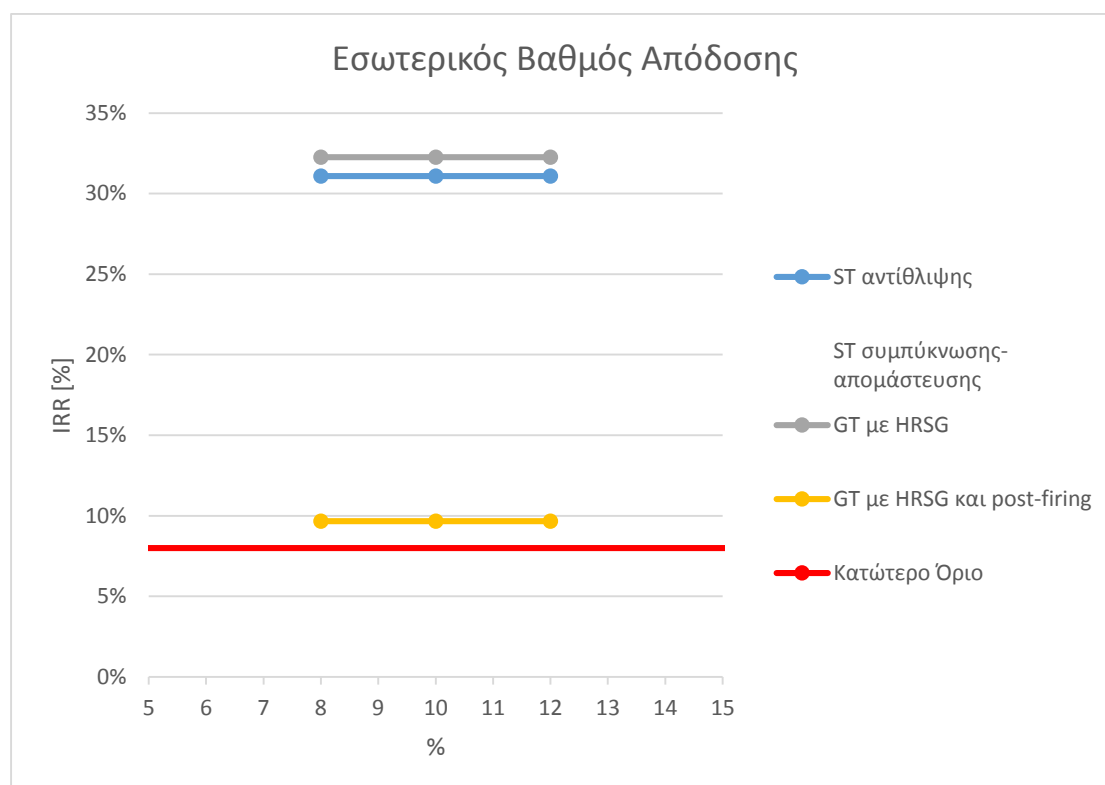
Καθαρή Παρούσα Αξία				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
8	5.039.514,11 €	-7.661.717,29 €	26.199.071,39 €	1.133.678,90 €
10	4.044.068,89 €	-7.609.071,80 €	21.111.927,28 €	-202.540,43 €
12	3.247.933,71 €	-7.565.257,78 €	17.043.238,57 €	-1.269.917,68 €



Σχήμα 6.57: Καθαρή Παρούσα Αξία

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

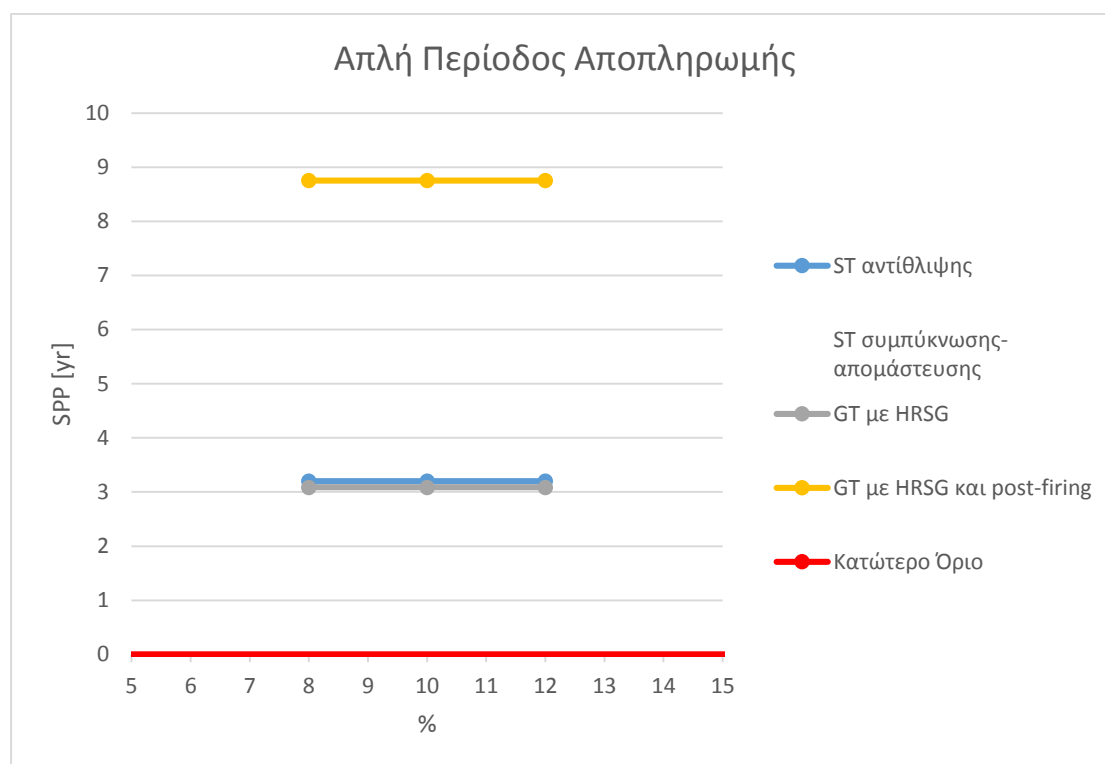
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
8	31%	-	32%	10%
10	31%	-	32%	10%
12	31%	-	32%	10%



Σχήμα 6.58: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

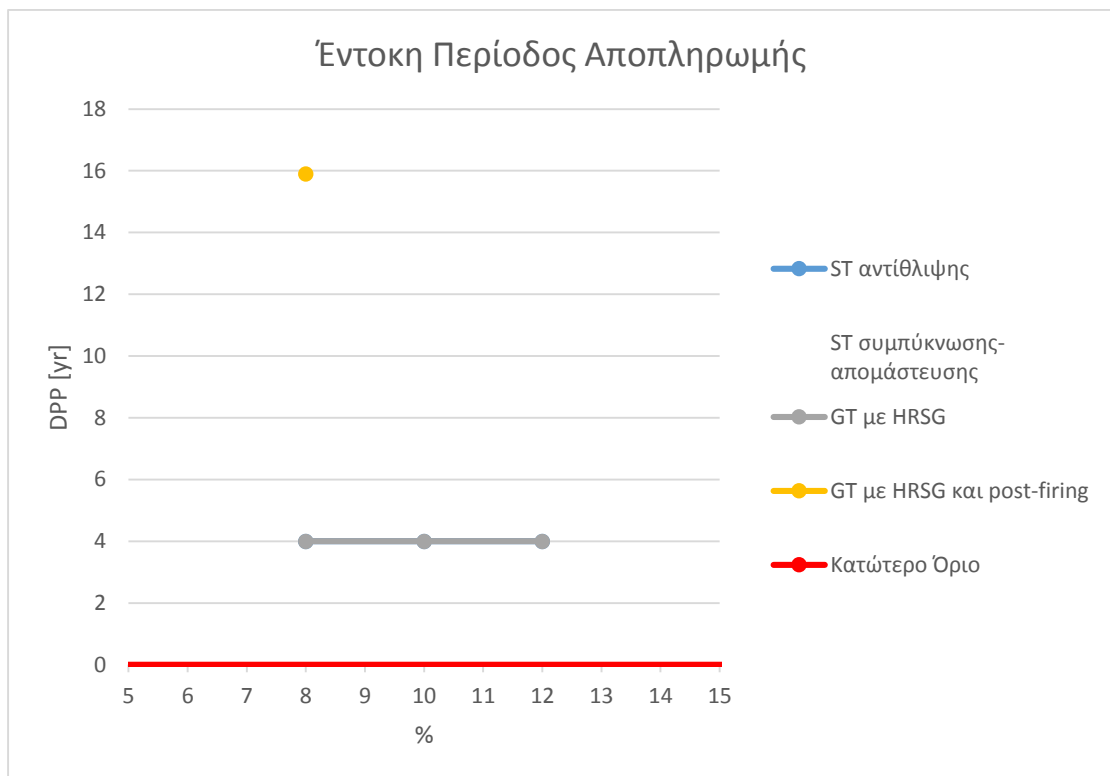
Απλή Περίοδος Αποπληρωμής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
8	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75
10	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75
12	3,20	Αρνητική Τιμή	3,09	8,75



Σχήμα 6.59: Απλή Περίοδος Αποπληρωμής

Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

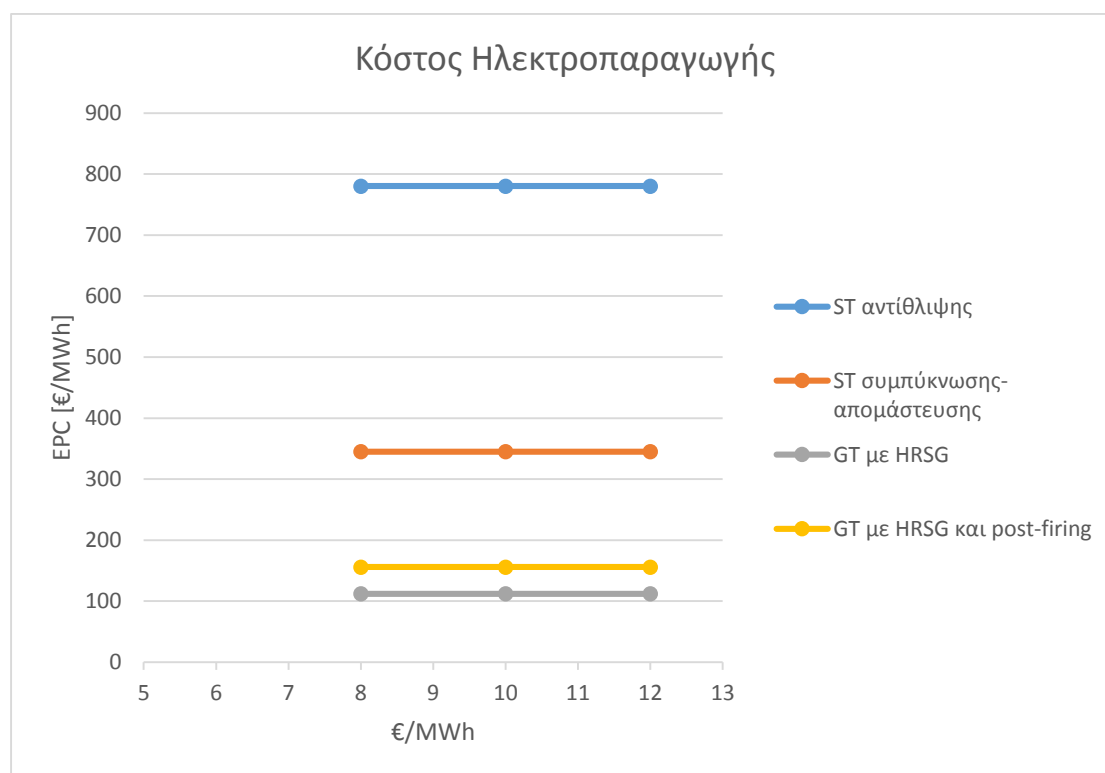
Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
8	4	-	4	15,9
10	4	-	4	-
12	4	-	4	-



Σχήμα 6.60: Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής				
%	ST αντίθλιψης	ST συμπύκνωσης-απομάστευσης	GT με HRSG	GT με HRSG και post-firing
8	780,39	345,14	112,26	156,08
10	780,39	345,14	112,26	156,08
12	780,39	345,14	112,26	156,08



Σχήμα 6.61: Κόστος Ηλεκτροπαραγωγής

6.3.2 Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι το σύστημα ατμοστρόβιλου αντίθλιψης καθώς και το σύστημα αεριοστρόβιλου με λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς επιπλέον καύση είναι οικονομικά συμφέρουσες ($NPV > 0$ και $IRR > r$). Και οι δύο εγκαταστάσεις αποσβάνονται σε περίπου 4 χρόνια λειτουργίας τους. Ωστόσο, τα υψηλότερα κέρδη, τα έχει η εγκατάσταση με αεριοστρόβιλο κέρδη (21.111.927,28 €) και στη συνέχεια η εγκατάσταση με ατμοστρόβιλο κέρδη (4.044.068,89 €). Για το λόγο αυτό, το σενάριο συμπαραγωγής Γ αποτελεί την οικονομικά βέλτιστη επένδυση. Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι θερμοδυναμικά βέλτιστη εγκατάσταση είναι αυτή του ατμοστρόβιλου αντίθλιψης. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουμε χαμηλό βαθμό απόδοσης συγκριτικά με την παραγωγή θερμικής ενέργειας, ωστόσο είναι ποιοτικά καλύτερη και πωλείται ακριβότερα.

Ανάλυση Ευαισθησίας

- **Κόστος Φυσικού Αερίου**
Όσο μικρότερο είναι, τόσο πιο συμφέρουσα είναι η επένδυση με εξαίρεση τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης που ισχύει το ακριβώς αντίθετο. Στον αεριοστρόβιλο με λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς επιπλέον καύση, η επένδυση μεταβάλλεται ελάχιστα με τη μεταβολή του κόστους Φυσικού Αερίου, ενώ στον αεριοστρόβιλο με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και επιπλέον καύση, η επένδυση, με κόστος Φυσικού Αερίου 20 €/MWh, είναι οικονομικά βιώσιμη. Τα ανωτέρω σχετίζονται με τη σχετική μεταβολή των εσόδων και των εξόδων κάθε μονάδας, λόγω μεταβολής της τιμής του Φυσικού Αερίου.
- **Κεφαλαιακό Κόστος**
Όσο μικρότερο είναι, τόσο πιο συμφέρουσα είναι η επένδυση.
Στον αεριοστρόβιλο με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και επιπλέον καύση, η επένδυση, με Κεφαλαιακό Κόστος 80% του αρχικού, καθίσταται οικονομικά βιώσιμη.
- **Δάνειο**
Όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο πιο γρήγορα γίνεται η απόσβεση. Όσο μειώνονται τα συνολικά κέρδη της επιχείρησης.
Στον αεριοστρόβιλο με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και επιπλέον καύση, η επένδυση, με Δάνειο 30% και 50%, καθίσταται οικονομικά βιώσιμη.
- **Επιτόκιο Προεξόφλησης**
Όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο μειώνεται η ΚΠΑ, χωρίς να μεταβάλλονται οι υπόλοιποι οικονομική δείκτες .
Στον αεριοστρόβιλο με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και επιπλέον καύση, η επένδυση, με Επιτόκιο Αναγωγής 8%, καθίσταται οικονομικά βιώσιμη.

Κεφάλαιο 7. Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε η δυνατότητα εγκατάστασης συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε διυλιστήριο. Πιο συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν εγκαταστάσεις, με διαφορετικές τεχνολογίες συμπαραγωγής, που έχουν ως σκοπό την κάλυψη των θερμικών αναγκών ενός διυλιστηρίου. Τα εξεταζόμενα συστήματα διαφέρουν ως προς τη μονάδα παραγωγής ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε μονάδα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης. Στη συνέχεια εξετάστηκε μονάδα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης. Έπειτα, η μονάδα που εξετάστηκε περιλάμβανε αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς επιπλέον καύση. Τέλος εξετάστηκε μονάδα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας με επιπλέον καύση.

Οι παραπάνω εγκαταστάσεις αναλύθηκαν ενεργειακά, εξεργειακά, καθώς και οικονομικά με σκοπό την εύρεση της πλέον βιώσιμης και οικονομικά βέλτιστης λύσης. Παράλληλα πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση λάβαμε υπόψιν τη επιστροφή του συμπυκνώματος, ενώ στη δεύτερη όχι. Ακόμα έγινε μία ανάλυση ευαισθησίας, η οποία απέβλεπε την εξέταση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν στο κάθε οικονομικό μοντέλο, ως συνέπεια των αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του. Στην παρούσα μελέτη, οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν για κάθε εγκατάσταση είναι το Κόστος Αγοράς Φυσικού Αερίου, το Κεφαλαιακό Κόστος, το Ποσοστό Δανειοδότησης, καθώς και το Επιτόκιο Αναγωγής.

Η εγκατάσταση συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης χαρακτηρίζεται από τη χαμηλότερη ηλεκτροπαραγωγή συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια. Έχει το βέλτιστο θερμικό και ολικό βαθμό απόδοσης ($\eta_h=91,73\%$ και $\eta=95,37\%$ αντίστοιχα). Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητά της, πρόκειται για εγκατάσταση ΣΗΘΥΑ είτε λαμβάνοντας υπόψιν την επιστροφή συμπυκνώματος είτε όχι. Οικονομικά, το σενάριο Α αποτελεί μία συμφέρουσα επένδυση ($KPA=4.044.068,89\text{€} > 0$, $IRR=31\% > 8\%$) με περίοδο αποπληρωμής περίπου ίση με 4 χρόνια. Μάλιστα πρόκειται για την επένδυση που απαιτεί το χαμηλότερο κεφάλαιο. Αυξάνοντας το Κόστος Φυσικού Αερίου βελτιώνονται οι οικονομικοί δείκτες, αποτέλεσμα το οποίο οφείλεται στη σχετική μεταβολή των εσόδων και των εξόδων της μονάδας. Τέλος, η χορήγηση Δανείου οδηγεί σε βελτίωση των οικονομικών δεικτών.

Η εγκατάσταση συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης - απομάστευσης χαρακτηρίζεται επίσης από χαμηλή ηλεκτροπαραγωγή. Έχει θερμικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta_h=74,31\%$ και ολικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta=82,81\%$. Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητά της, πρόκειται για εγκατάσταση ΣΗΘΥΑ λαμβάνοντας υπόψιν τη μη επιστροφή συμπυκνώματος. Με επιστροφή συμπυκνώματος η μονάδα δεν είναι ΣΗΘΥΑ. Οικονομικά, το σενάριο Β δεν αποτελεί μία βιώσιμη επένδυση ($KPA=-7.609.071,80\text{€} < 0$). Με την ανάλυση ευαισθησίας καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης είναι μία μη συμφέρουσα επένδυση.

Η εγκατάσταση συμπαραγωγής με ατεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας χωρίς επιπλέον καύση χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη ηλεκτροπαραγωγή. Έχει το μεγαλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ($\eta_e=26,43\%$) και ολικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta=80,38\%$. Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητά της, πρόκειται για εγκατάσταση ΣΗΘΥΑ είτε λαμβάνοντας υπόψιν την επιστροφή συμπυκνώματος είτε όχι και μάλιστα με τον υψηλότερο δείκτη PESR. Οικονομικά, το σενάριο Γ αποτελεί τη βέλτιστη επένδυση ($KPA=21.111.927,28\text{€} > 0$, $IRR=32\% > 8\%$) με περίοδο αποπληρωμής περίπου ίση με 4 χρόνια. Πρόκειται για την επένδυση που απαιτεί το υψηλότερο κεφάλαιο, οδηγεί όμως και στα υψηλότερα κέρδη. Αύξηση του Κόστους Φυσικού Αερίου οδηγεί σε πολύ μικρή βελτίωση των οικονομικών δεικτών, αποτέλεσμα το οποίο οφείλεται στη σχετική μεταβολή των εσόδων και των εξόδων της μονάδας. Τέλος, η χορήγηση Δανείου οδηγεί σε βελτίωση των οικονομικών δεικτών.

Η εγκατάσταση συμπαραγωγής με ατεριοστρόβιλο και λέβητα ανάκτησης θερμότητας με επιπλέον καύση χαρακτηρίζεται επίσης από υψηλή ηλεκτροπαραγωγή. Έχει ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta_e=18,74\%$ και ολικό βαθμό απόδοσης ίσο με $\eta=75,75\%$. Όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητά της, πρόκειται για εγκατάσταση ΣΗΘΥΑ λαμβάνοντας υπόψιν τη μη επιστροφή συμπυκνώματος. Με επιστροφή συμπυκνώματος η μονάδα δεν είναι ΣΗΘΥΑ. Οικονομικά, το σενάριο Δ δεν αποτελεί μία βιώσιμη επένδυση ($KPA=-202.504,43\text{€} < 0$). Πρόκειται για μία επένδυση που απαιτεί υψηλότερο κεφάλαιο. Μείωση του Κόστους Φυσικού Αερίου μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμη λύση. Το ίδιο μπορεί να ισχύσει και με μείωση του Κεφαλαιακού Κόστους, με χορήγηση Δανείου και με μείωση του Επιτόκιου Αναγωγής.

Όσον αφορά την αξιολόγηση ενεργειακής αποδοτικότητας των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψιν μη επιστροφή συμπυκνώματος στην ενεργειακή αξιολόγηση προκύπτει $PESR > 10\%$ και κατάσταση πλήρους συμπαραγωγής για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Αντιθέτως στην περίπτωση που αφαιρείται το συμπύκνωμα από την ωφέλιμη θερμότητα, για τις περιπτώσεις Β, η μονάδα δεν είναι ΣΗΘΥΑ ($PESR < 10\%$ και $PESR_{CHP} < 10\%$ αντίστοιχα).

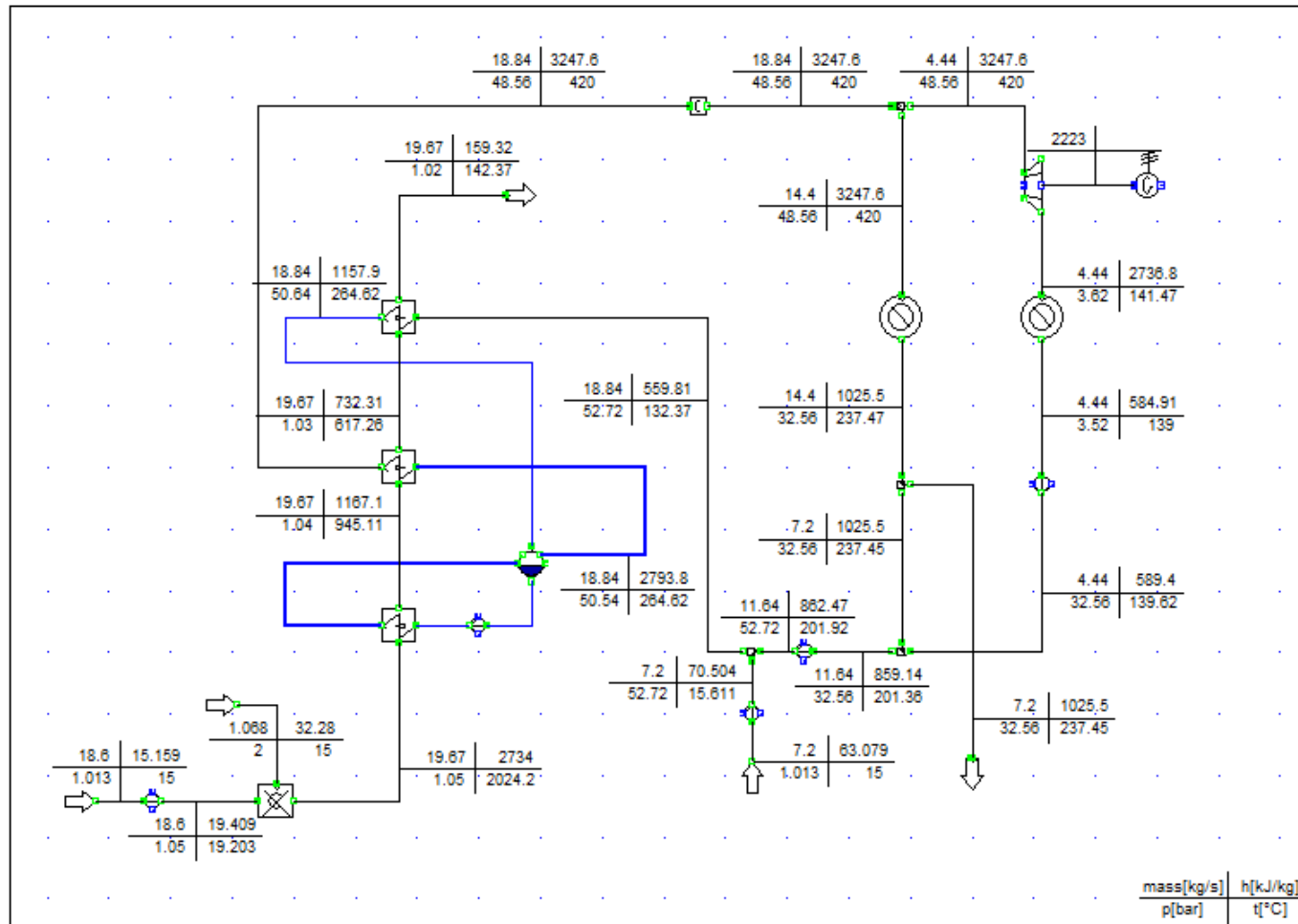
Συνεπώς, η νέα νομοθεσία θα είναι λιγότερο ελαστική ως προς το χαρακτηρισμό μίας μονάδας ως ΣΗΘΥΑ.

Παράρτημα

Παράρτημα Α – Ανάλυση

Στο παράρτημα Α παρουσιάζεται αναλυτικά η γραφική προσομοίωση της κάθε εγκατάστασης με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος 'IPSEpro', τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά σε κάθε σημείο της, η ενεργειακή και εξεργειακή ανάλυση κάθε στοιχείου της, η αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας της καθώς και η οικονομική ανάλυση της.

A.1 Σενάριο Συμπαραγωγής A - Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης



Σχήμα A.1: Ατμοστρόβιλος Αντίθλιψης

A.1.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση


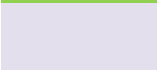
Fuel , Air , Exhaust							
	aa (f)	a (a)	b (a)	c (e)	d (e)	e (e)	f (e)
p [bar]	2,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
T [C]	15,0	15,0	19,2	2024,2	945,1	617,3	142,4
h [kJ/kg]	32,3	15,2	19,4	2734,0	1167,1	732,3	159,3
s[kJ/kgK]	11,1	6,8	6,9	9,8	8,9	8,5	7,6
m [kg/s]	1,1	18,6	18,6	19,7	19,7	19,7	19,7
h0 [kJ/kg]	32,3	15,2	15,2	16,6	16,6	16,6	16,6
s0[kJ/kgK]	11,1	6,8	6,8	7,2	7,2	7,2	7,2
E [kW]	55484,9	0,0	75,0	52655,0	22112,2	13684,5	2685,8

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας A.1: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Καυσίμου, Αέρα και Καυσαερίου

Steam_Water

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	8b	9	10	11	12	13
p [bar]	32,6	52,7	52,7	50,6	50,5	53,0	50,6	50,5	48,6	48,6	48,6	32,6	32,6	3,6	3,5	32,6
T [C]	201,4	201,9	132,4	264,6	264,6	264,7	264,8	264,6	420,0	420,0	420,0	237,5	237,5	141,5	139,0	139,6
h [kJ/kg]	859,1	862,5	559,8	1157,9	1157,9	1158,3	2793,8	2793,8	3247,6	3247,6	3247,6	1025,5	1025,5	2736,8	584,9	589,4
s[kJ/kgK]	2,3	2,3	1,7	2,9	2,9	2,9	6,0	6,0	6,7	6,7	6,7	2,7	2,7	6,9	1,7	1,7
m [kg/s]	11,6	11,6	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	14,4	4,4	14,4	7,2	4,4	4,4	4,4
h0 [kJ/kg]	66,1	68,0	68,0	67,8	67,8	68,0	67,8	67,8	67,6	67,6	67,6	66,1	66,1	63,3	63,3	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	8861,5	8877,4	8861,0	19773,3	19773,5	19776,5	49734,2	49734,1	58070,7	44385,2	13685,4	13285,3	6642,7	11423,2	2215,7	2223,0

 Παραδοχές
 Αποτελέσματα

Πίνακας Α.2: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού - Ατμού

Condensate Steam_Water			
	100	101	200
p [bar]	1,013	52,722	32,563
T [C]	15,000	15,611	237,450
h [kJ/kg]	63,079	70,504	1025,500
s[kJ/kgK]	0,225	0,232	2,679
m [kg/s]	7,200	7,200	7,200
h0 [kJ/kg]	63,079	68,016	66,095
s0[kJ/kgK]	0,225	0,224	0,224
E [kW]	0,000	16,980	6642,656

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.3: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού

A.1.2 Ενεργειακή Ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού

Ενεργειακή ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού	
	Ενέργεια [kW]
Combustor	-
Evaporator	-30812,82
Superheater	-8549,592
Economizer	-11268,0156
Turbine	2267,952
Heat sink_HP	31998,24
Heat sink_LP	9554,3916
Pump (a-b)	-
Pump (4-5)	-7,536
Pump (0-1)	-38,7612
Pump (12-13)	-19,9356
Pump (100-101)	-53,46
Mixer (10-13)	0
Mixer (1-101)	0
Drum	0
Generator	-

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.4: Ενεργειακή Ανάλυση των Τμημάτων του Κυκλώματος Νερού-Ατμού

(Θετικό πρόσημο έχουμε όπου παράγεται ενέργεια, ενώ αρνητικό ενώ καταστρέφεται)

A.1.3 Εξεργειακή Ανάλυση

Εξεργειακή Ανάλυση							
Combustor		Turbine		Pump (a-b)		Mixer (10-13)	
I [kW]	2904,8969	I [kW]	61,878348	I [kW]	11,976468	I [kW]	4,211912
ζ	0,9477159	ζ	0,9726474	ζ	0,862246	ζ	0,999525
Evaporator		Heat sink_HP		Pump (4-5)		Mixer (1-101)	
I [kW]	585,18477	Q [kW]	32012,39	I [kW]	5,2595801	I [kW]	33,3807
ζ	0,9808405	I [kW]	5730,1662	ζ	0,3655206	ζ	0,996247
Superheater		Heat sink_LP		Pump (0-1)		Drum	
I [kW]	91,186239	Q [kW]	9154,0203	I [kW]	26,672626	I [kW]	0
ζ	0,9891802	I [kW]	53,502501	ζ	0,37443	Generator	
Economizer				Pump (12-13)		P [kW]	
I [kW]	86,424154			I [kW]	14,570263	1942,2	
ζ	0,9921423			ζ	0,3355759	Generator Loss	
				Pump (100-101)		P [kW]	
				I [kW]	41,826019	280,6	
				ζ	0,2887457		

 Αποτελέσματα

Πίνακας A.5: Εξεργειακή Ανάλυση

A.1.4 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο φύλλο υπολογισμού καθώς και τα αποτελέσματα για το σημείο λειτουργίας της μονάδας που εξετάστηκε παραπάνω. Σημειώνεται ότι με κίτρινο χρώμα είναι τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό ενώ με γκρι είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

A.1.4.1 Με Επιστροφή Συμπυκνώματος

		Scenarios		ST	
				Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{ST} (MW)	1,9422	1,9422	
		E_c (MW)	1,9422		
		E_{max} (MW)		1,9422	
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)			
		Q_{EVAP} (MW)			
		Q_{ECO} (MW)			
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)			
	Heat output total	H (MW)			
FUEL	Supplementary firing	m_B (kg/sec)			
		LHV_{PF} (KJ/Kg)			
		F_{AS} (MW)			
		η_{AS}			
		H_{AS} (MW)	No additional firing		
Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	48,94			
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)			
		η_e			
	Fuel input	F_c (MW)	53,35	53,35	

Σχήμα A.2: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,036
	η_h	0,917
	H	0,9537

Σχήμα Α.3:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION	Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
		Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
		Percentage of fuel1 (%)	80,00
		Percentage of fuel2 (%)	20,00
		Installation construction year	Από το 2016
		$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
		$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
		Climate zone temperature (°C)	18,00
		$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
		Output Voltage for grid	100-200 kV
		Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
		$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
		$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
		$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
		$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
		$\eta_{loss,parIV}$	0,963
		η_{er} fuel1	0,508
		η_{er} fuel2	0,423
		η_{er} FINAL	0,491
		type of heating	Ατμός (*) (α16)
		$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
		condesates return?	Ναι
		$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,82
		$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,80
		$P_{condensates}$ (%)	61,8
		η_{hr} fuel1	0,839
η_{hr} fuel2	0,819		
η_{hr} FINAL	0,835		

Σχήμα Α.4:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	3,96
		F_H (MW)	58,60
		PES (MW)	9,21
		PESR	14,72%

High efficiency CHP

Σχήμα Α.5: Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.1.4.2 Χωρίς Επιστροφή Συμπυκνώματος

ST		Scenarios	Ecnom	Ecmax
POWER	Power output	P_{ST} (MW)	1,9422	1,9422
		E_c (MW)	1,9422	
		E_{max} (MW)		1,9422
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW) Q_{EVAP} (MW) Q_{ECO} (MW)		
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)		
	Heat output total	H (MW)		
	Supplementary firing	m_B (kg/sec) LHV _{PF} (KJ/Kg) F_{AS} (MW) η_{AS} H_{AS} (MW)	No additional firing	
	Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	58,92	
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh) η_e		
	Fuel input	F_c (MW)	53,35	53,35

Σχήμα Α.6: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,036
	η_h	1,104
	H	1,1407

Σχήμα Α.7:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION	Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
		Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
		Percentage of fuel1 (%)	80,00
		Percentage of fuel2 (%)	20,00
		Installation construction year	Από το 2016
		$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
		$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
		Climate zone temperature (°C)	18,00
		$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
		Output Voltage for grid	100-200 kV
		Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
		$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
		$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
		$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
		$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
		$\eta_{loss,parIV}$	0,963
		η_{er} fuel1	0,508
		η_{er} fuel2	0,423
		η_{er} FINAL	0,491
		type of heating	Ατμός (*) (α16)
		$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
		condesates return?	Όχι
		$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,92
		$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,90
		$P_{condensates}$ (%)	0,0
		η_{hr} fuel1	0,870
η_{hr} fuel2	0,850		
η_{hr} FINAL	0,866		

Σχήμα Α.8:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	3,96
		F_H (MW)	68,03
		PES (MW)	18,64
		PESR	25,89%

High efficiency CHP

Σχήμα Α.9:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.1.5 Οικονομική Ανάλυση

Εγκατεστημένη Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	1,94
Ώρες λειτουργίας [hr]	8500
Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας	0,97
Κόστος Επένδυσης [€]	1942200
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€]	489362,3
Κόστος Διασύνδεσης [€]	0,0
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€/kW]	20
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€]	38844
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΚΘΙ]	27,78
Ισχύς Καυσίμου [MW ΚΘΙ]	53,35
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€]	12596734
Κόστος Εκπομπών CO2 [€]	669564,83
Φόρος [%]	20%
Ρυθμός Απόσβεσης [%]	5%
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	8%
Επίτοκιο Αναγωγής [%]	10%
Τιμή Πώλησης [€/MWh]	83,94
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας [€]	1385728,55
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€]	12838208,9
Υπολειμματική Αξία [%κόστους επένδυσης]	3%
Υπολειμματική Αξία [€]	72946,87
Ποσοστό Απορρόφησης Ενέργειας [%]	100%
Ηλεκτρική ενέργεια [MWh]	16508,7
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Χρόνος Αποπληρωμής	20
Συνολικό Κόστος Επένδυσης [€]	2431562,3
Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας Εγκατάστασης [€]	13305142,50
Ετήσια Έσοδα [€]	14223937,46

	Δεδομένα
	Αποτελέσματα

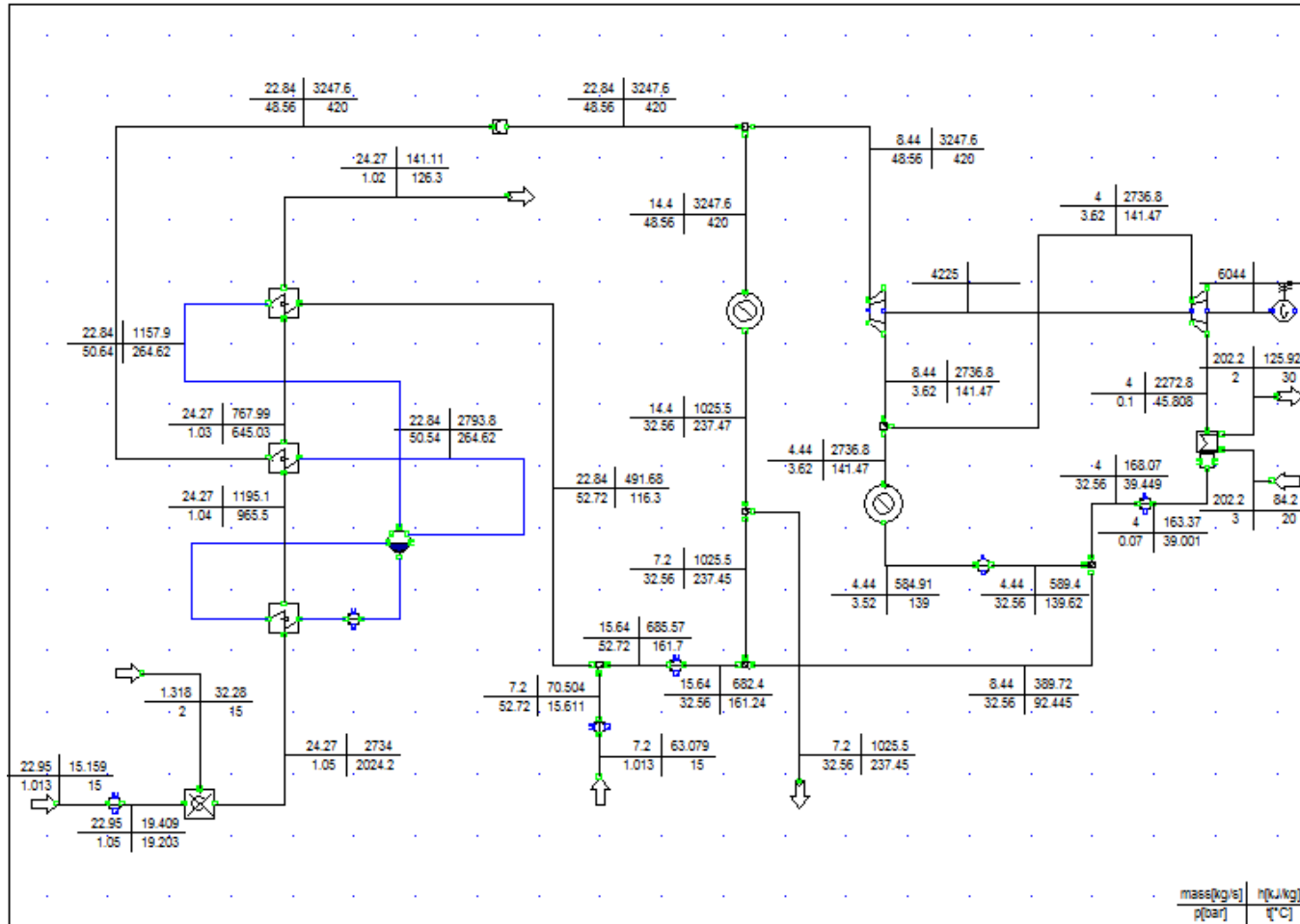
Πίνακας Α.6: Οικονομικά Στοιχεία

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικά Κόστη	Τόκοι	Υποτίμηση	Κέρδη προ Φόρων	Καθαρά Κέρδη	Χρεωλύσιο Δανείου	Καθαρή Ταμειακή Ροή
0								-2431562,32
1	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
2	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
3	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
4	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
5	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
6	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
7	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
8	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
9	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
10	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
11	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
12	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
13	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
14	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
15	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
16	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
17	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
18	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
19	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	759351,59
20	14223937	13305142,50	0,00	121578,12	797216,84	637773,47	0,00	832298,46

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.7: Οικονομικά Στοιχεία

A.2 Σενάριο Συμπαραγωγής Β - Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης



Σχήμα Α.10: Ατμοστρόβιλος Συμπύκνωσης – Απομάστευσης

A.2.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση

Fuel , Air , Exhaust							
	aa (f)	a (a)	b (a)	c (e)	d (e)	e (e)	f (e)
p [bar]	2,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
T [C]	15,0	15,0	19,2	2024,2	965,5	645,0	126,3
h [kJ/kg]	32,3	15,2	19,4	2734,0	1195,1	768,0	141,1
s[kJ/kgK]	11,1	6,8	6,9	9,8	8,9	8,5	7,5
m [kg/s]	1,3	23,0	23,0	24,3	24,3	24,3	24,3
h0 [kJ/kg]	32,3	15,2	15,2	16,6	16,6	16,6	16,6
s0[kJ/kgK]	11,1	6,8	6,8	7,2	7,2	7,2	7,2
E [kW]	68488,5	0,0	92,5	64993,3	27964,9	17742,8	2889,4

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.8: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Καυσίμου, Αέρα και Καυσαερίου

Steam_Water

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8a	8b	9	10	11	11a	11b	12	13	14	15	16	17
p [bar]	32,6	52,7	52,7	50,6	50,5	53,0	50,6	50,5	48,6	48,6	48,6	32,6	32,6	3,6	3,6	3,6	3,5	32,6	0,1	0,1	32,6	32,6
T [C]	161,2	161,7	116,3	264,6	264,6	264,7	264,8	264,6	420,0	420,0	420,0	237,5	237,5	141,5	141,5	141,5	139,0	139,6	45,8	39,0	39,4	92,4
h [kJ/kg]	682,4	685,6	491,7	1157,9	1157,9	1158,3	2793,8	2793,8	3247,6	3247,6	3247,6	1025,5	1025,5	2736,8	2736,8	2736,8	584,9	589,4	2272,8	163,4	168,1	389,7
s [kJ/kgK]	2,0	2,0	1,5	2,9	2,9	2,9	6,0	6,0	6,7	6,7	6,7	2,7	2,7	6,9	6,9	6,9	1,7	1,7	7,2	0,6	0,6	1,2
m [kg/s]	15,6	15,6	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	22,8	14,4	8,4	14,4	7,2	8,4	4,4	4,0	4,4	4,4	4,0	4,0	4,0	8,4
h0 [kJ/kg]	66,1	68,0	68,0	67,8	67,8	68,0	67,8	67,8	67,6	67,6	67,6	66,1	66,1	63,3	63,3	63,3	63,3	66,1	63,0	63,0	66,1	66,1
s0 [kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	9233,7	9252,6	9245,0	23971,5	23971,7	23975,4	60293,4	60293,4	70399,9	44385,2	26014,7	13285,3	6642,7	21714,4	11423,2	10291,2	2215,7	2223,0	8422,3	381,5	387,3	2605,5

 Παραδοχές
 Αποτελέσματα

Πίνακας Α.9: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού - Ατμού

Condensate Steam_Water			
	100	101	200
p [bar]	1,0	52,7	32,6
T [C]	15,0	15,6	237,5
h [kJ/kg]	63,1	70,5	1025,5
s[kJ/kgK]	0,2	0,2	2,7
m [kg/s]	7,2	7,2	7,2
h0 [kJ/kg]	63,1	68,0	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2
E [kW]	0,0	17,0	6642,7

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.10: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού

Cooling Water		
	1000	2000
p [bar]	3,0	2,0
T [C]	20,0	30,0
h [kJ/kg]	84,2	125,9
s[kJ/kgK]	0,3	0,4
m [kg/s]	202,2	202,2
h0 [kJ/kg]	63,3	63,2
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2
E [kW]	4014,3	12045,2

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.11: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Ψυκτικού Νερού

A.2.2 Ενεργειακή Ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού

Ενεργειακή ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού	
	Ενέργεια [kW]
Combustor	-
Evaporator	-37354,82
Superheater	-10364,792
Economizer	-15216,4648
Turbine_HP	4311,152
Turbine_LP	1856
Heat sink_HP	31998,24
Heat sink_LP	9554,3916
Condenser	8437,72
Pump (a-b)	-
Pump (4-5)	-9,136
Pump (0-1)	-49,5788
Pump (12-13)	-19,9356
Pump (15-16)	-18,8
Pump (100-101)	-53,46
Mixer (13-16)	0
Mixer (10-17)	0
Mixer (1-101)	0
Drum	0
Generator	-

Αποτελέσματα

Πίνακας A.12: Ενεργειακή Ανάλυση των Τμημάτων του Κυκλώματος Νερού-Ατμού

(Θετικό πρόσημο έχουμε όπου παράγεται ενέργεια, ενώ αρνητικό ενώ καταστρέφεται)

A.2.3 Εξεργειακή Ανάλυση

Εξεργειακή Ανάλυση							
Combustor		Turbine_HP		Pump (a-b)		Mixer (13-16)	
I [kW]	3587,71574	I [kW]	117,62461	I [kW]	14,78302	I [kW]	4,7778638
ζ	0,9476865	ζ	0,9726474	ζ	0,862246	ζ	0,9981696
Evaporator		Turbine_LP		Pump (4-5)		Mixer (10-17)	
I [kW]	710,354201	I [kW]	68,165297	I [kW]	6,3762638	I [kW]	14,4999
ζ	0,98081596	ζ	0,9635257	ζ	0,3655206	ζ	0,9984321
Superheater		Heat sink_HP		Pump (0-1)		Mixer (1-101)	
I [kW]	115,709874	Q [kW]	30889,893	I [kW]	35,611697	I [kW]	24,55248
ζ	0,98868052	I [kW]	6852,6636	ζ	0,3470138	ζ	0,9973513
Economizer		Heat sink_LP		Pump (12-13)		Drum	
I [kW]	126,944673	Q [kW]	9154,0203	I [kW]	14,570263	I [kW]	0
ζ	0,99145349	I [kW]	53,502501	ζ	0,3355759	Generator	
		Condenser		Pump (15-16)		P [kW] 5596,1	
		I [kW]	9,9733218	I [kW]	14,864999	Generator Loss	
		ζ	0,9987597	ζ	0,2811896	P [kW] 448,1	
				Pump (100-101)			
				I [kW]	41,826019		
				ζ	0,2887457		

Αποτελέσματα

Πίνακας A.13: Εξεργειακή Ανάλυση

A.2.4 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο φύλλο υπολογισμού καθώς και τα αποτελέσματα για το σημείο λειτουργίας της μονάδας που εξετάστηκε παραπάνω. Σημειώνεται ότι με κίτρινο χρώμα είναι τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό ενώ με γκρι είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

A.2.4.1 Με Επιστροφή Συμπυκνώματος

		Scenarios		ST	
				Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{ST} (MW)	5,5961	5,5961	
		E_c (MW)	5,5961		
		E_{max} (MW)		5,5961	
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)			
		Q_{EVAP} (MW)			
		Q_{ECO} (MW)			
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)			
	Heat output total	H (MW)			
	Supplementary firing	m_B (kg/sec)			
LHV_{PF} (KJ/Kg)					
F_{AS} (MW)					
η_{AS}					
	H_{AS} (MW)	No additional firing			
	Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	48,94		
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)			
		η_e			
	Fuel input	F_c (MW)	65,85	65,85	

Σχήμα A.11: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,085
	η_h	0,743
	H	0,8281

Σχήμα Α.12:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION	Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
		Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
		Percentage of fuel1 (%)	80,00
		Percentage of fuel2 (%)	20,00
		Installation construction year	Από το 2016
		$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
		$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
		Climate zone temperature (°C)	18,00
		$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
		Output Voltage for grid	100-200 kV
		Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
		$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
		$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
		$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
		$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
		$\eta_{loss,parIV}$	0,963
		η_{er} fuel1	0,508
		η_{er} fuel2	0,423
		η_{er} FINAL	0,491
		type of heating	Ατμός (*) (α16)
		$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
		condesates return?	Ναι
		$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,82
		$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,80
		$P_{condensates}$ (%)	61,8
		η_{hr} fuel1	0,839
η_{hr} fuel2	0,819		
η_{hr} FINAL	0,835		

Σχήμα Α.13:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	11,41
		F_H (MW)	58,60
		PES (MW)	4,15
		PESR	5,93%
		!!Low efficiency CHP!!	

Σχήμα Α.14:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

CHP & non-CHP EVALUATION	Basic parameters for dividing CHP & non- CHP production	$\eta_{e,max}$	0,085
		CHP technology	Ατμοστρόβιλος συμπίκνωσης- απομάστευσης
		η_{CHP} (= $\eta_{κατ}$)	0,80
		B	0,000
		C	0,119
	CHP production	E_{CHP} (MW)	5,82
		F_{CHP} (MW)	68,44
		$\eta_{e,CHP}$	0,08
		$\eta_{h,CHP}$	0,72
		$F_{E,CHP}$ (MW)	11,86
		PES_{CHP} (MW)	2,01
		$PESR_{CHP}$	2,86%

Σχήμα Α.15:Επιμερισμός της μονάδας ΣΗΘ σε συμπαραγωγικό και μη συμπαραγωγικό μέρος και υπολογισμός του λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, $PESR_{CHP}$

A.2.4.2 Χωρίς Επιστροφή Συμπυκνώματος

		Scenarios		ST	
				Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{ST} (MW)	5,5961	5,5961	
		E_c (MW)	5,5961		
		E_{max} (MW)		5,5961	
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)			
		Q_{EVAP} (MW)			
		Q_{ECO} (MW)			
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)			
	Heat output total	H (MW)			
	Supplementary firing	m_B (kg/sec)			
LHV_{PF} (KJ/Kg)					
F_{AS} (MW)					
η_{AS}		No additional firing			
	H_{AS} (MW)				
	Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	58,92		
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)			
		η_e			
	Fuel input	F_c (MW)	65,85	65,85	

Σχήμα Α.16: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,085
	η_h	0,895
	H	0,9796

Σχήμα Α.17:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
	Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
	Percentage of fuel1 (%)	80,00
	Percentage of fuel2 (%)	20,00
	Installation construction year	Από το 2016
	$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
	$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
	Climate zone temperature (°C)	18,00
	$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
	Output Voltage for grid	100-200 kV
	Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
	$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
	$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
	$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
	$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
	$\eta_{loss,parIV}$	0,963
	η_{er} fuel1	0,508
	η_{er} fuel2	0,423
	η_{er} FINAL	0,491
	type of heating	Ατμός (*) (α16)
	$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
	$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
	condesates return?	Όχι
$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,92	
$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,90	
$P_{condensates}$ (%)	0,0	
η_{hr} fuel1	0,870	
η_{hr} fuel2	0,850	
η_{hr} FINAL	0,866	

Σχήμα Α.18:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	11,41
		F_H (MW)	68,03
		PES (MW)	13,59
		PESR	17,10%

High efficiency CHP

Σχήμα Α.19:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.2.5 Οικονομική Ανάλυση

Εγκατεστημένη Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	5,60
Ώρες λειτουργίας [hr]	8500
Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας	0,97
Κόστος Επένδυσης [€]	6715320
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€]	489362,3
Κόστος Διασύνδεσης [€]	0
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€/kW]	24
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€]	134306
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΚΟΙ]	27,78
Ισχύς Καυσίμου [MW ΚΟΙ]	65,85
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€]	15548946
Κόστος Εκπομπών CO2 [€]	826460,58
Φόρος [%]	20%
Ρυθμός Απόσβεσης [%]	5%
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	8%
Επιτόκιο Αναγωγής [%]	10%
Τιμή Πώλησης [€/MWh]	73,95
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας [€]	3517353,77
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€]	12838208,9
Υπολειμματική Αξία [%κόστους επένδυσης]	3%
Υπολειμματική Αξία [€]	216140,47
Ποσοστό Απορρόφησης Ενέργειας [%]	100%
Ηλεκτρική ενέργεια [MWh]	47566,9
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Χρόνος Αποπληρωμής	20
Συνολικό Κόστος Επένδυσης [€]	7204682,3
Ετήσιο κόστος λειτουργίας εγκατάστασης [€]	16509712,66
Ετήσια Έσοδα [€]	16355562,67

	Δεδομένα
	Αποτελέσματα

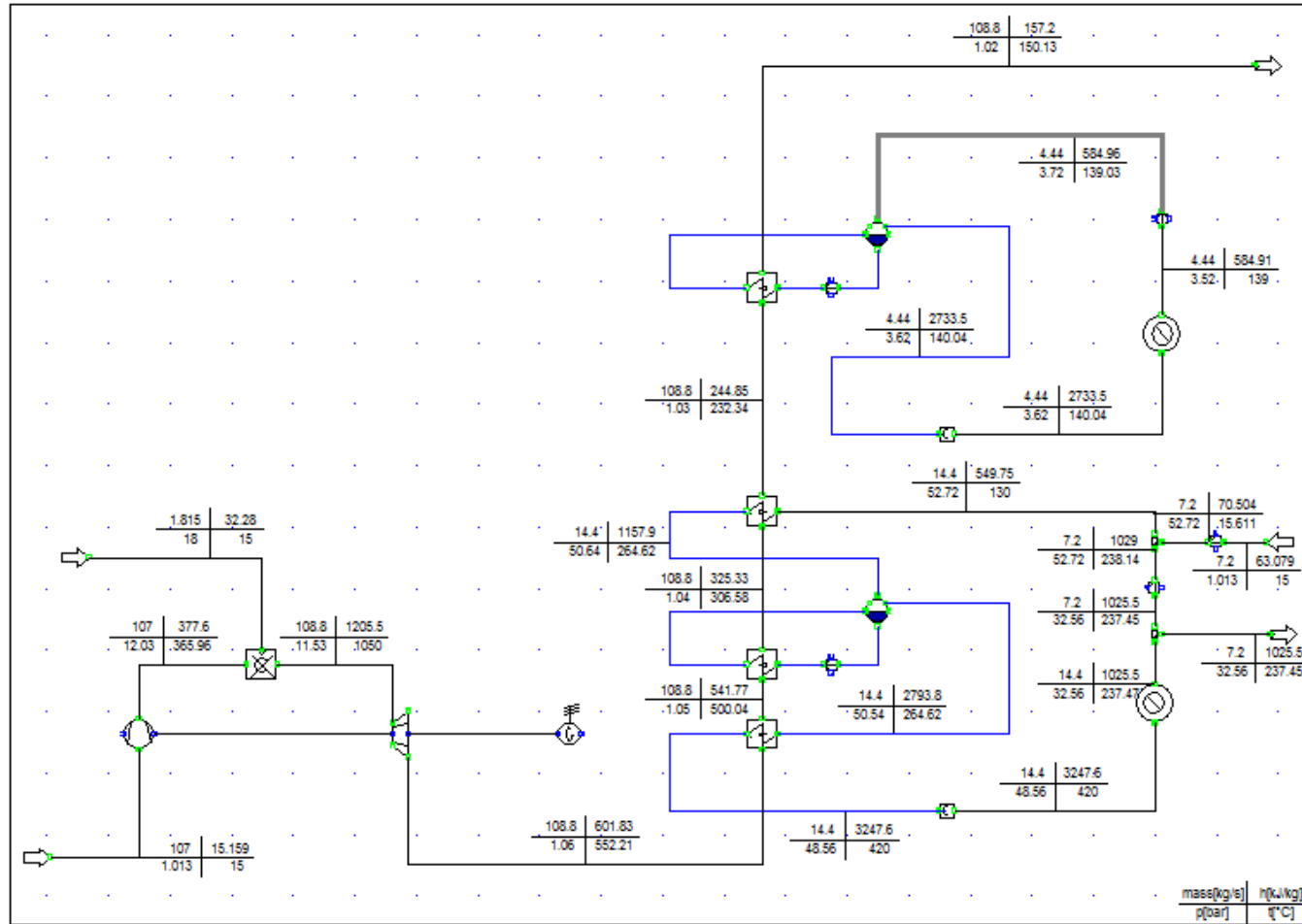
Πίνακας Α.14: Οικονομικά Στοιχεία

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικά Κόστη	Τόκοι	Υποτίμηση	Κέρδη προ Φόρων	Καθαρά Κέρδη	Χρεωλύσιο Δανείου	Καθαρή Ταμειακή Ροή
0								-7204682,32
1	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
2	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
3	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
4	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
5	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
6	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
7	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
8	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
9	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
10	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
11	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
12	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
13	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
14	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
15	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
16	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
17	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
18	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
19	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	-51273,17
20	16355563	16509712,66	0,00	360234,12	-514384,11	-411507,28	0,00	164867,30

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.15: Οικονομικά Στοιχεία

A.3 Σενάριο Συμπαραγωγής Γ - Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας



Σχήμα A.20: Αεριοστρόβιλος με Ανάκτηση Θερμότητας

A.3.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση

Fuel , Air , Exhaust									
	aa (f)	a (a)	b (a)	c (e)	d (e)	e (e)	f (e)	g (e)	h (e)
p [bar]	18,0	1,0	12,0	11,5	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
T [C]	15,0	15,0	366,0	1050,0	552,2	500,0	306,6	232,3	150,1
h [kJ/kg]	32,3	15,2	377,6	1205,5	601,8	541,8	325,3	244,9	157,2
s[kJ/kgK]	10,0	6,8	7,0	8,0	8,1	8,0	7,7	7,6	7,4
m [kg/s]	1,8	107,0	107,0	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8	108,8
h0 [kJ/kg]	32,3	15,2	15,2	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
s0[kJ/kgK]	10,0	6,8	6,1	6,3	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
E [kW]	94314,0	0,0	37465,6	126685,4	61931,0	55518,6	32493,2	23978,5	14750,0

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας A.16: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Καυσίμου, Αέρα και Καυσαερίου

High Pressure Steam_Water										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p [bar]	32,6	52,7	52,7	50,6	50,5	53,0	50,6	50,5	48,6	32,6
T [C]	237,5	238,1	130,0	264,6	264,6	264,7	264,8	264,6	420,0	237,5
h [kJ/kg]	1025,5	1029,0	549,8	1157,9	1157,9	1158,3	2793,8	2793,8	3247,6	1025,5
s[kJ/kgK]	2,7	2,7	1,6	2,9	2,9	2,9	6,0	6,0	6,7	2,7
m [kg/s]	7,2	7,2	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
h0 [kJ/kg]	66,1	68,0	68,0	67,8	67,8	68,0	67,8	67,8	67,6	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	6642,7	6653,8	6633,3	15113,4	15113,5	15115,8	38013,4	38013,4	44385,2	13285,3

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.17: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού Υψηλής Πίεσης

Low Pressure Steam_Water						
	00.	11	22	33	44	55
p [bar]	3,5	3,7	3,6	6,7	3,7	3,6
T [C]	139,0	139,0	140,1	140,1	142,4	140,0
h [kJ/kg]	584,9	585,0	589,4	589,9	2738,0	2733,5
s[kJ/kgK]	1,7	1,7	1,7	1,7	6,9	6,9
m [kg/s]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
h0 [kJ/kg]	63,3	63,3	63,3	63,6	63,3	63,3
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	2215,7	2215,8	2234,9	2235,6	11429,1	11409,1

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.18: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού Χαμηλής Πίεσης

Condensate Steam_Water			
	100	101	200
p [bar]	1,0	52,7	32,6
T [C]	15,0	15,6	237,5
h [kJ/kg]	63,1	70,5	1025,5
s[kJ/kgK]	0,2	0,2	2,7
m [kg/s]	7,2	7,2	7,2
h0 [kJ/kg]	63,1	68,0	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2
E [kW]	0,0	17,0	6642,7

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.19: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού

A.3.2 Ενεργειακή Ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού

Ενεργειακή ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού	
	Ενέργεια [kW]
Compressor	-
Combustor	-
Turbine	-
Heat sink_HP	31998,24
Heat sink_LP	9539,7396
Superheater_HP	-6534,72
Evaporator_HP	-23551,2
Economizer_HP	-8757,36
Evaporator_LP	-9537,6528
Pump (0-1)	-25,2
Pump (4-5)	-5,76
Pump (00-11)	-0,222
Pump (22-33)	-2,0868
Pump (100-101)	-53,46
Mixer (1-101)	0
Drum HP	0
Drum LP	0
Generator	-

Αποτελέσματα

Πίνακας A.20: Ενεργειακή Ανάλυση των Τμημάτων του Κυκλώματος Νερού-Ατμού

(Θετικό πρόσημο έχουμε όπου παράγεται ενέργεια, ενώ αρνητικό ενώ καταστρέφεται)

A.3.3 Εξεργειακή Ανάλυση

Εξεργειακή Ανάλυση							
Compressor		Superheater_HP		Pump (0-1)		Mixer (1-101)	
I [kW]	1711,3449	I [kW]	40,53233	I [kW]	16,61013175	I [kW]	37,46268
ζ	0,9563175	ζ	0,9936791	ζ	0,400788898	ζ	0,994384
Combustor		Evaporator_HP		Pump (4-5)		Drum HP	
I [kW]	5094,1586	I [kW]	127,90479	I [kW]	4,02006126	I [kW]	0
ζ	0,9613433	ζ	0,9944451	ζ	0,365520634		
Turbine		Economizer_HP		Pump (00-11)		Drum LP	
I [kW]	1026,4446	I [kW]	34,565863	I [kW]	0,114081388	I [kW]	0
ζ	0,9841486	ζ	0,9959404	ζ	0,53283625		
Heat sink_HP		Evaporator_LP		Pump (22-33)		Generator	
Q [kW]	30889,893	I [kW]	35,10337	I [kW]	1,532895704	P [kW]	23970
I [kW]	6852,6642	ζ	0,9961962	ζ	0,332211257		
ζ	0,8184367			Pump (100-101)		Generator Loss	
Heat sink_LP				I [kW]	41,82601932	P [kW]	833
Q [kW]	9139,9823			ζ	0,288745718		
I [kW]	53,414657						
ζ	0,9941899						

Αποτελέσματα

Πίνακας A.21: Εξεργειακή Ανάλυση

A.3.4 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο φύλλο υπολογισμού καθώς και τα αποτελέσματα για το σημείο λειτουργίας της μονάδας που εξετάστηκε παραπάνω. Σημειώνεται ότι με κίτρινο χρώμα είναι τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό ενώ με γκρι είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

A.3.4.1 Με Επιστροφή Συμπυκνώματος

		Scenarios		GT	
				Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{GT} (MW)	23,97	23,97	
		E_c (MW)	23,97		
		E_{max} (MW)		23,97	
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)			
		Q_{EVAP} (MW)			
		Q_{ECO} (MW)			
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)			
	Heat output total	H (MW)			
	Supplementary firing	m_B (kg/sec)			
LHV _{PF} (KJ/Kg)					
F_{AS} (MW)					
η_{AS} H_{AS} (MW)		No additional firing			
Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	48,92			
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)			
		η_e			
	Fuel input	F_c (MW)	90,69	90,69	

Σχήμα A.21: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,264
	η_h	0,539
	H	0,8038

Σχήμα Α.22:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION	Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
		Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
		Percentage of fuel1 (%)	80,00
		Percentage of fuel2 (%)	20,00
		Installation construction year	Από το 2016
		$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
		$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
		Climate zone temperature (°C)	18,00
		$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
		Output Voltage for grid	100-200 kV
		Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
		$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
		$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
		$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
		$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
		$\eta_{loss,parIV}$	0,963
		η_{er} fuel1	0,508
		η_{er} fuel2	0,423
		η_{er} FINAL	0,491
		type of heating	Ατμός (*) (α16)
		$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
		condesates return?	Ναι
		$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,82
		$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,80
		$P_{condensates}$ (%)	61,8
		η_{hr} fuel1	0,839
η_{hr} fuel2	0,819		
η_{hr} FINAL	0,835		

Σχήμα Α.23:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	48,86
		F_H (MW)	58,58
		PES (MW)	16,76
		PESR	15,60%

High efficiency CHP

Σχήμα A.24: Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.3.4.2 Χωρίς Επιστροφή Συμπυκνώματος

		GT		Scenarios		Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{GT} (MW)		23,97	23,97		
		E_c (MW)		23,97			
		E_{max} (MW)				23,97	
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)					
		Q_{EVAP} (MW)					
		Q_{ECO} (MW)					
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)					
	Heat output total	H (MW)					
FUEL	Supplementary firing	m_B (kg/sec)					
		LHV _{PF} (KJ/Kg)					
		F_{AS} (MW)					
		η_{AS}					
		H_{AS} (MW)			No additional firing		
	Heat CHP output	H_{CHP} (MW)		58,90			
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)					
		η_e					
	Fuel input	F_c (MW)		90,69	90,69		

Σχήμα A.25: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,264
	η_h	0,650
	H	0,9138

Σχήμα Α.26:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION	Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
		Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
		Percentage of fuel1 (%)	80,00
		Percentage of fuel2 (%)	20,00
		Installation construction year	Από το 2016
		$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
		$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
		Climate zone temperature (°C)	18,00
		$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
		Output Voltage for grid	100-200 kV
		Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
		$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
		$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
		$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
		$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
		$\eta_{loss,parIV}$	0,963
		η_{er} fuel1	0,508
		η_{er} fuel2	0,423
		η_{er} FINAL	0,491
		type of heating	Ατμός (*) (α16)
		$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
		condesates return?	Όχι
		$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,87
		$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,85
		$P_{condensates}$ (%)	0,0
		η_{hr} fuel1	0,870
η_{hr} fuel2	0,850		
η_{hr} FINAL	0,866		

Σχήμα Α.27:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	48,86
		F_H (MW)	68,02
		PES (MW)	26,19
		PESR	22,41%

High efficiency CHP

Σχήμα Α.28:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.3.5 Οικονομική Ανάλυση

Εγκατεστημένη Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	23,97
Ώρες λειτουργίας [hr]	8500
Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας	0,97
Κόστος Επένδυσης [€]	11985000
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€]	0,0
Κόστος Διασύνδεσης [€]	0
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€/kW]	10
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€]	239700
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΚΘΙ]	27,78
Ισχύς Καυσίμου [MW ΚΘΙ]	90,69
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€]	21412088
Κόστος Εκπομπών CO2 [€]	1138065,94
Φόρος [%]	20%
Ρυθμός Απόσβεσης [%]	5%
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	8%
Επίτοκιο Αναγωγής [%]	10%
Τιμή Πώλησης [€/MWh]	71,94
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας [€]	14657270,53
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€]	12834365,0
Υπολειμματική Αξία [%κόστους επένδυσης]	3%
Υπολειμματική Αξία [€]	359550,00
Ποσοστό Απορρόφησης Ενέργειας [%]	100%
Ηλεκτρική ενέργεια [MWh]	203745,0
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Χρόνος Αποπληρωμής	20
Συνολικό Κόστος Επένδυσης [€]	11985000,0
Ετήσιο κόστος λειτουργίας εγκατάστασης [€]	22789854,24
Ετήσια Έσοδα [€]	27491635,55

	Δεδομένα
	Αποτελέσματα

Πίνακας A.22: Οικονομικά Στοιχεία

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικά Κόστη	Τόκοι	Υποτίμηση	Κέρδη προ Φόρων	Καθαρά Κέρδη	Χρεωλύσιο Δανείου	Καθαρή Ταμειακή Ροή
0								-11985000,00
1	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
2	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
3	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
4	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
5	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
6	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
7	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
8	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
9	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
10	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
11	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
12	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
13	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
14	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
15	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
16	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
17	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
18	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
19	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	3881275,05
20	27491636	22789854,24	0,00	599250,00	4102531,31	3282025,05	0,00	4240825,05

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.23: Οικονομικά Στοιχεία

A.4.1 Θερμοδυναμική Ανάλυση

Fuel , Air , Exhaust											
	aa (f)	a (a)	b (a)	c (e)	d (e)	aaa (f)	dd (e)	e (e)	f (e)	g (e)	h (e)
p [bar]	18,0	1,0	12,5	12,0	1,1	2,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
T [C]	15,0	15,0	373,3	850,0	409,4	15,0	488,7	444,5	281,2	218,9	150,1
h [kJ/kg]	32,3	15,2	385,4	945,4	434,3	32,1	524,9	475,0	295,6	228,8	156,2
s[kJ/kgK]	10,0	6,8	7,0	7,7	7,9	11,0	8,0	7,9	7,6	7,5	7,4
m [kg/s]	1,5	129,5	129,5	131,0	131,0	0,2	131,2	131,2	131,2	131,2	131,2
h0 [kJ/kg]	32,3	15,2	15,2	15,5	15,5	32,1	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
s0[kJ/kgK]	10,0	6,8	6,1	6,2	6,9	11,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
E [kW]	76806,1	0,0	46333,0	118886,6	53073,6	12450,3	64793,7	58390,3	35398,1	26891,8	17667,9

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας A.24: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Καυσίμου, Αέρα και Καυσαερίου

High Pressure Steam_Water										
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
p [bar]	32,6	52,7	52,7	50,6	50,5	53,0	50,6	50,5	48,6	32,6
T [C]	237,5	238,1	130,0	264,6	264,6	264,7	264,8	264,6	420,0	237,5
h [kJ/kg]	1025,5	1029,0	549,8	1157,9	1157,9	1158,3	2793,8	2793,8	3247,6	1025,5
s[kJ/kgK]	2,7	2,7	1,6	2,9	2,9	2,9	6,0	6,0	6,7	2,7
m [kg/s]	7,2	7,2	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
h0 [kJ/kg]	66,1	68,0	68,0	67,8	67,8	68,0	67,8	67,8	67,6	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	6642,7	6653,8	6633,3	15113,4	15113,5	15115,8	38013,4	38013,4	44385,2	13285,3

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.25: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού Υψηλής Πίεσης

Low Pressure Steam_Water						
	00.	11	22	33	44	55
p [bar]	3,5	3,7	3,6	6,7	3,7	3,6
T [C]	139,0	139,0	140,1	140,1	142,4	140,0
h [kJ/kg]	584,9	585,0	589,4	589,9	2738,0	2733,5
s[kJ/kgK]	1,7	1,7	1,7	1,7	6,9	6,9
m [kg/s]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
h0 [kJ/kg]	63,3	63,3	63,3	63,6	63,3	63,3
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
E [kW]	2215,7	2215,8	2234,9	2235,6	11429,1	11409,1

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.26: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού Χαμηλής Πίεσης

Condensate Steam_Water			
	100	101	200
p [bar]	1,0	52,7	32,6
T [C]	15,0	15,6	237,5
h [kJ/kg]	63,1	70,5	1025,5
s[kJ/kgK]	0,2	0,2	2,7
m [kg/s]	7,2	7,2	7,2
h0 [kJ/kg]	63,1	68,0	66,1
s0[kJ/kgK]	0,2	0,2	0,2
E [kW]	0,0	17,0	6642,7

	Παραδοχές
	Αποτελέσματα

Πίνακας Α.27: Θερμοδυναμικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Νερού – Ατμού

A.4.2 Ενεργειακή Ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού

Ενεργειακή ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού	
	Ενέργεια [kW]
Compressor	-
Combustor_1	-
Turbine	-
Heat sink_HP	31998,24
Heat sink_LP	9539,7396
Combustor_2	-
Superheater_HP	-6534,72
Evaporator_HP	-23551,2
Economizer_HP	-8757,36
Evaporator_LP	-9537,6528
Pump (0-1)	-25,2
Pump (4-5)	-5,76
Pump (00-11)	-0,222
Pump (22-33)	-2,0868
Pump (100-101)	-53,46
Mixer (1-101)	0
Drum HP	0
Drum LP	0
Generator	-

Αποτελέσματα

Πίνακας A.28: Ενεργειακή ανάλυση των τμημάτων του κυκλώματος νερού-ατμού

(Θετικό πρόσημο έχουμε όπου παράγεται ενέργεια, ενώ αρνητικό ενώ καταστρέφεται)

A.4.3 Εξεργειακή Ανάλυση

Εξεργειακή Ανάλυση							
Compressor		Combustor_2		Pump (0-1)		Mixer (1-101)	
I [kW]	2105,045	I [kW]	730,17153	I [kW]	16,610132	I [kW]	37,46268
ζ	0,9565415	ζ	0,9888564	ζ	0,4007889	ζ	0,994384
Combustor_1		Superheater_HP		Pump (4-5)		Drum HP	
I [kW]	4252,4847	I [kW]	31,54619	I [kW]	4,0200613	I [kW]	0
ζ	0,965466	ζ	0,9950735	ζ	0,3655206		
Turbine		Evaporator_HP		Pump (00-11)		Drum LP	
I [kW]	864,04624	I [kW]	94,694655	I [kW]	0,1140814	I [kW]	0
ζ	0,9868712	ζ	0,9958815	ζ	0,5328362		
Heat sink_HP		Economizer_HP		Pump (22-33)		Generator	
Q [kW]	30910,86	I [kW]	26,182228	I [kW]	1,5328957	P [kW]	16087
I [kW]	6831,6963	ζ	0,996922	ζ	0,3322113	Generator Loss	
ζ	0,8189922	Evaporator_LP		Pump (100-101)		P [kW]	591
Heat sink_LP		I [kW]	30,459505	I [kW]	41,826019		
Q [kW]	9145,6077	ζ	0,9966978	ζ	0,2887457		
I [kW]	47,789224						
ζ	0,9948018						

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.29: Εξεργειακή ανάλυση

A.4.4 Αξιολόγηση Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Παρακάτω παρατίθενται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο φύλλο υπολογισμού καθώς και τα αποτελέσματα για το σημείο λειτουργίας της μονάδας που εξετάστηκε παραπάνω. Σημειώνεται ότι με κίτρινο χρώμα είναι τα δεδομένα που πρέπει να εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό ενώ με γκρι είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

A.4.4.1 Με Επιστροφή Συμπυκνώματος

GT		Scenarios	Ecnom	Ecmx
POWER	Power output	P_{GT} (MW)	16,087	16,087
		E_c (MW)	16,087	
		E_{max} (MW)		16,087
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)		
		Q_{EVAP} (MW)		
		Q_{ECO} (MW)		
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)		
	Heat output total	H (MW)		
	Supplementary firing	m_B (kg/sec)		
		LHV_{PF} (KJ/Kg)		
F_{AS} (MW)				
η_{AS}				
	H_{AS} (MW)	Additional firing		
Heat CHP output	H_{CHP} (MW)	48,92		
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)		
	Fuel input	F_c (MW)	85,82	85,82

Σχήμα A.30: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,187
	η_h	0,570
	η	0,7575

Σχήμα Α.31:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

MAIN EFFICIENCIES EVALUATION

Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
	Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
	Percentage of fuel1 (%)	80,00
	Percentage of fuel2 (%)	20,00
	Installation construction year	Από το 2016
	$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
	$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
	Climate zone temperature (°C)	18,00
	$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
	Output Voltage for grid	100-200 kV
	Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
	$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
	$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
	$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
	$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
	$\eta_{loss,parIV}$	0,963
	η_{er} fuel1	0,508
	η_{er} fuel2	0,423
	η_{er} FINAL	0,491
	type of heating	Ατμός (*) (α16)
	$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
	$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
	condesates return?	Ναι
	$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,82
	$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,80
$P_{condensates}$ (%)	61,8	
η_{hr} fuel1	0,839	
η_{hr} fuel2	0,819	
η_{hr} FINAL	0,835	

Σχήμα Α.32:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}

PESR EVALUATION	PES & PESR	F_E (MW)	32,79
		F_H (MW)	58,58
		PES (MW)	5,55
		PESR	6,08%
		!!!Low efficiency CHP!!!	

Σχήμα A.33:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

CHP & non-CHP EVALUATION	Basic parameters for dividing CHP & non-CHP production	$\eta_{e,max}$	0,187
		CHP technology	Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας
		η_{CHP} ($=\eta_{κατ}$)	0,75
		B	0,000
		C	0,333
	CHP production	E_{CHP} (MW)	16,30
		F_{CHP} (MW)	86,96
		$\eta_{e,CHP}$	0,19
		$\eta_{h,CHP}$	0,56
		$F_{E,CHP}$ (MW)	33,23
		PES_{CHP} (MW)	4,85
		$PESR_{CHP}$	5,28%

Σχήμα A.34:Επιμερισμός της μονάδας ΣΗΘ σε συμπαραγωγικό και μη συμπαραγωγικό μέρος και υπολογισμός του λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, $PESR_{CHP}$

A.4.4.2 Χωρίς Επιστροφή Συμπυκνώματος

		GT		Scenarios		Ecnom	Ecmx	
POWER	Power output	P_{GT} (MW)				16,087	16,087	
		E_c (MW)				16,087		
		E_{max} (MW)						16,087
HEAT	Heat output HP	Q_{SSH} (MW)						
		Q_{EVAP} (MW)						
		Q_{ECO} (MW)						
	Heat output LP	$Q_{EVAP,LP}$ (MW)						
	Heat output total	H (MW)						
	Supplementary firing	m_B (kg/sec)						
		LHV_{PF} (KJ/Kg)						
F_{AS} (MW)								
η_{AS}								
	H_{AS} (MW)						Additional firing	
Heat CHP output	H_{CHP} (MW)					58,90		
FUEL	Specific Heat Consumption electrical efficiency	SHC (kJ/kWh)						
		η_e						
	Fuel input	F_c (MW)					85,82	85,82

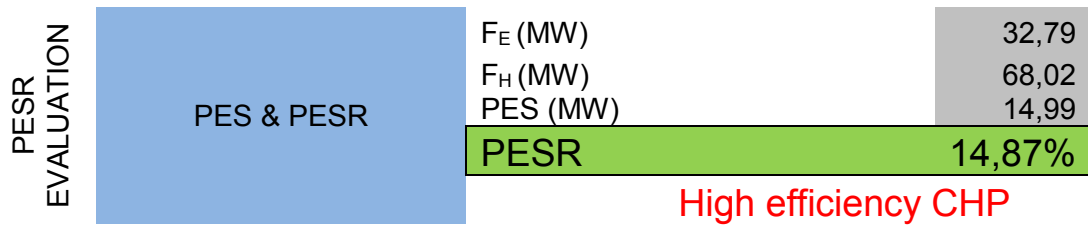
Σχήμα A.35: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος και κατανάλωση καυσίμου στην μονάδα

Efficiencies of CHP unit	η_e	0,187
	η_h	0,686
	H	0,8738

Σχήμα A.36:Υπολογισμός βαθμών απόδοσης μονάδας ΣΗΘ, η_e και η_h

Harmonized efficiencies	Type of fuel1	Φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και βιομεθάνιο
	Type of fuel2	Αέρια διυλιστηρίου, υδρογόνο και αέριο σύνθεσης
	Percentage of fuel1 (%)	80,00
	Percentage of fuel2 (%)	20,00
	Installation construction year	Από το 2016
	$\eta_{e,parI}$ fuel1	0,530
	$\eta_{e,parI}$ fuel2	0,442
	Climate zone temperature (°C)	18,00
	$\eta_{loss,parIII}$	-0,003
	Output Voltage for grid	100-200 kV
	Output Voltage for self-consumption	0,45-12 kV
	$\eta_{loss,on-grid}$	0,963
	$P_{e,on-grid}$ (%)	100,00
	$\eta_{loss,self-consumption}$	0,891
	$P_{e,self-consumption}$ (%)	0,00
	$\eta_{loss,parIV}$	0,963
	η_{er} fuel1	0,508
	η_{er} fuel2	0,423
	η_{er} FINAL	0,491
	type of heating	Ατμός (*) (α16)
	$\eta_{hr,parII}$ fuel1	0,87
	$\eta_{hr,parII}$ fuel2	0,85
	condesates return?	Όχι
$\eta_{hr,conden}$ fuel1	0,87	
$\eta_{hr,conden}$ fuel2	0,85	
$P_{condensates}$ (%)	0,0	
η_{hr} fuel1	0,870	
η_{hr} fuel2	0,850	
η_{hr} FINAL	0,866	

Σχήμα A.37:Υπολογισμός εναρμονισμένων βαθμών απόδοσης, η_{er} και η_{hr}



Σχήμα Α.38:Υπολογισμός λόγου εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, PESR, της μονάδας ΣΗΘ

A.4.5 Οικονομική Ανάλυση

Εγκατεστημένη Ηλεκτρική Ισχύς [MW]	16,09
Ώρες λειτουργίας [hr]	8500
Συντελεστής Εκμεταλλευσιμότητας	0,97
Κόστος Επένδυσης [€]	8847850
Κόστος Εγκατάστασης Λέβητα [€]	0,0
Κόστος Διασύνδεσης [€]	0
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€/kW]	11
Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας [€]	176957
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€/MWh ΚΘΙ]	27,78
Ισχύς Καυσίμου [MW ΚΘΙ]	85,82
Τιμή Αγοράς ΦΑ [€]	20263866
Κόστος Εκπομπών CO2 [€]	1077531,83
Φόρος [%]	20%
Ρυθμός Απόσβεσης [%]	5%
Επιτόκιο Δανεισμού [%]	8%
Επιτόκιο Αναγωγής [%]	10%
Τιμή Πώλησης [€/MWh]	71,94
Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας [€]	9836942,47
Πώληση Θερμικής Ενέργειας [€]	12834365,0
Υπολειμματική Αξία [%κόστους επένδυσης]	3%
Υπολειμματική Αξία [€]	265435,50
Ποσοστό Απορρόφησης Ενέργειας [%]	100%
Ηλεκτρική ενέργεια [MWh]	136739,5
Ιδία κεφάλαια	100%
Επιχορήγηση	0%
Δάνειο	0%
Χρόνος Αποπληρωμής	20
Συνολικό Κόστος Επένδυσης [€]	8847850,0
Ετήσιο κόστος λειτουργίας εγκατάστασης [€]	21518355,10
Ετήσια Έσοδα [€]	22671307,49

	Δεδομένα
	Αποτελέσματα

Πίνακας A.30: Οικονομικά Στοιχεία

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικά Κόστη	Τόκοι	Υποτίμηση	Κέρδη προ Φόρων	Καθαρά Κέρδη	Χρεωλύσιο Δανείου	Καθαρή Ταμειακή Ροή
0								-8847850,00
1	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
2	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
3	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
4	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
5	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
6	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
7	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
8	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
9	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
10	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
11	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
12	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
13	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
14	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
15	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
16	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
17	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
18	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
19	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1010840,41
20	22671307	21518355,10	0,00	442392,50	710559,89	568447,91	0,00	1276275,91

Αποτελέσματα

Πίνακας Α.31: Οικονομικά Στοιχεία

Παράρτημα Β – Νομοθεσία

Νομικό πλαίσιο Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Με το νόμο υπ' αριθμό 3734 του 2009, εναρμονίζεται η ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 2004/8/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 11-2-2004 για την προώθηση της συμπαραγωγής ενέργειας βάσει της ζήτησης για χρήσιμη θερμότητα στην εσωτερική αγορά ενέργειας, όπως επίσης για την τροποποίηση της Οδηγίας 92/42/ΕΟΚ (ΕΕ L 52/50). Έτσι, συμπληρώνεται το νομικό πλαίσιο για την προώθηση της συμπαραγωγής δύο ή περισσότερων χρήσιμων μορφών ενέργειας.

Ορισμοί σύμφωνα με το Ν.3734/2009

Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ)

Η ταυτόχρονη παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ή/και μηχανικής ενέργειας από την ίδια αρχική ενέργεια, στο πλαίσιο μόνο μίας διεργασίας. Όπου στην παρούσα απόφαση αναφέρεται ο όρος 'συμπαραγωγή', νοείται η Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ), όπως εδώ ορίζεται.

Χρήσιμη θερμική ενέργεια H_{CHP}

Η θερμική ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο διεργασίας συμπαραγωγής, προκειμένου να ικανοποιήσει οικονομικά δικαιολογημένη ζήτηση για θέρμανση ή ψύξη, η οποία καθορίζεται ως η ζήτηση που δεν υπερβαίνει τις ανάγκες θέρμανσης ή ψύξης και η οποία διαφορετικά θα ικανοποιείτο, σύμφωνα με τις συνθήκες της αγοράς, από διαδικασίες παραγωγής χρήσιμων μορφών ενέργειας διαφορετικές από τη συμπαραγωγή.

Μονάδα συμπαραγωγής

Η μονάδα, η δυνάμενη να λειτουργεί κατά τον τρόπο της συμπαραγωγής.

Ηλεκτρική ενέργεια από τη μονάδα συμπαραγωγής E_c

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τη μονάδα συμπαραγωγής. Εάν μια μονάδα συμπαραγωγής παράγει και μηχανική ενέργεια, αυτή προστίθεται στην ηλεκτρική ενέργεια και συμπεριλαμβάνεται στην E_c.

Ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή E_{CHP}

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο μιας διεργασίας συνδεδεμένης με την παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας. Σε αυτή περιλαμβάνεται και η μηχανική ενέργεια που ενδεχομένως παράγεται από τη συμπαραγωγή.

Ενέργεια καυσίμου F_c

Το σύνολο της ενέργειας καυσίμου (ή καυσίμων) που καταναλώθηκε από τη μονάδα συμπαραγωγής για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, E_c, και της χρήσιμης θερμικής ενέργειας, H_{CHP}. Διευκρινίζεται ότι η ενέργεια αυτή υπολογίζεται με βάση την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου.

Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης η_e

Ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τη μονάδα συμπαραγωγής προς την ενέργεια καυσίμου που καταναλώθηκε από τη μονάδα συμπαραγωγής για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, E_c, και της χρήσιμης θερμικής ενέργειας, H_{CHP}:

$$\eta_e = \frac{E_c}{F_c} \quad (\text{B.1})$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης η_h

Ο λόγος της χρήσιμης θερμικής ενέργειας που προέρχεται από συμπαραγωγή, H_{CHP} , προς την ενέργεια καυσίμου που καταναλώθηκε από τη μονάδα συμπαραγωγής για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, E_c , και της χρήσιμης θερμικής ενέργειας, H_{CHP} :

$$\eta_h = \frac{H_{CHP}}{F_c} \quad (\text{B.2})$$

Ολικός βαθμός απόδοσης η

Το άθροισμα του ηλεκτρικού και του θερμικού βαθμού απόδοσης:

$$\eta = \eta_e + \eta_h \quad (\text{B.3})$$

Τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για χωριστή παραγωγή

Ο βαθμός απόδοσης της χωριστής παραγωγής θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία αποσκοπεί να υποκαταστήσει η διεργασία συμπαραγωγής:

η_{er} είναι η τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

η_{hr} είναι η τιμή αναφοράς του βαθμού απόδοσης για τη χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας

Αποδοτικότητα συμπαραγωγής

Το ποσοστό εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή χρήσιμης θερμικής και ηλεκτρικής ή και μηχανικής ενέργειας.

Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ)

Η συμπαραγωγή που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τουλάχιστον κατά δέκα τοις εκατό (10%) σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή από μονάδες συμπαραγωγής μικρής και πολύ μικρής κλίμακας που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ανεξαρτήτως ποσοστού, χαρακτηρίζεται ως συμπαραγωγή υψηλής αποδοτικότητας.

Λόγος ηλεκτρικής προς θερμική ενέργεια C

Ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή προς τη χρήσιμη θερμική ενέργεια, όπως υπολογίζεται στην παρούσα.

Παραγωγή από συμπαραγωγή

Το άθροισμα της ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας και της χρήσιμης θερμικής ενέργειας που παράγονται από τη συμπαραγωγή. Επί πλέον των προηγούμενων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι ορισμοί.

Κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής

Η κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία η μονάδα συμπαραγωγής παράγει τη μέγιστη τεχνικά δυνατή χρήσιμη θερμότητα και, συγκεκριμένα, όταν επιτυγχάνει ολικό βαθμό απόδοσης τουλάχιστον ίσο με 80% εάν είναι συνδυασμένος κύκλος αεριοστροβίλου με

ανάκτηση θερμότητας, ή ατμοστρόβιλος συμπύκνωσης – απομάστευσης, ή τουλάχιστον ίσο με 75% εάν είναι οποιουδήποτε άλλου τύπου.

Κατώφλι του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης $\eta_{κατ}$

Η ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μονάδας συμπαραγωγής, προκειμένου να θεωρηθεί ότι η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας πλήρους συμπαραγωγής:

Για συστήματα συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου με ανάκτηση θερμότητας ή ατμοστρόβιλος συμπύκνωσης – απομάστευσης: $\eta_{κατ} = 0,80$

Για συστήματα οποιουδήποτε άλλου τύπου: $\eta_{κατ} = 0,75$

Συντελεστής απώλειας ηλεκτρικής ισχύος β

Ο συντελεστής που ορίζεται από τη σχέση

$$\beta = \frac{-\Delta E_c}{\Delta E_{CHP}} \quad (B.4)$$

όπου ΔE_c είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας εξαιτίας μεταβολής ΔH_{CHP} της χρήσιμης θερμικής ενέργειας της μονάδας συμπαραγωγής. Σε μονάδες συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης, θετικό ΔH_{CHP} προκαλεί αρνητικό ΔE_c . Για τον λόγο αυτόν τίθεται το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω εξίσωση, ώστε η τιμή του β να είναι θετική. Αν και ο συντελεστής β ορίζεται αρχικά για μονάδες με ατμοστρόβιλο συμπύκνωσης – απομάστευσης, ο ορισμός ισχύει και για οποιοδήποτε σύστημα στο οποίο η αύξηση της παραγωγής χρήσιμης θερμότητας προκαλεί μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας.

Περίοδος αναφοράς

Η χρονική περίοδος για την οποία ζητείται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή και της αποδοτικότητας της συμπαραγωγής.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://merciarising.wordpress.com/2011/10/06/10-most-beautiful-machines/>
- [2] Εκπαιδευτικό Εγχειρίδιο Διυλιστηρίου : ‘Μηχανολογικός & Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός, 2005
- [3] Κ. Μαθιουδάκης : ‘Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων’, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- [4] <http://mda139.net/steamturbine/types-of-rotor-construction.html>
- [5] <http://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/gas-turbine-for-power-generation-introduction>
- [6] Ε. Κακαράς, Σ. Καρέλλας. : ‘Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα’, Εκδόσεις ΤΣΟΤΡΑΣ, Αθήνα 2015
- [7] Ε. Κακαράς : ‘Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί’, Εκδόσεις Fountas, Αθήνα 1999
- [8] Διαλέξεις του μαθήματος ‘Θερμική Παραγωγή Ενέργειας σε ΑΗΣ 1’
- [9] Χ. Φραγκόπουλος. : ‘Ανάλυση και βελτιστοποίηση ενεργειακών συστημάτων’, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2005
- [10] <https://www.quora.com/What-is-a-Grassmann-diagram>
- [11] <http://www.simtechnology.com/CMS/index.php/ipsepro>
- [12] Κατ’ εξουσιοδότηση κανονισμός (ΕΕ) 2015/2402 της επιτροπής της 12^{ης} Οκτωβρίου 2015
- [13] ΦΕΚ Αριθμού Φύλλου 1420
- [14] Κ. Αραβώσης, Α. Καρμπέρης, Α. Σωτήρχος: ‘Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση Επενδύσεων’, Οικονομική Βιβλιοθήκη, 2011
- [15] Α.Α.Δράκος , Γ. Α. Καραθανάσης: ‘Χρηματοοικονομική Διοίκηση Επιχειρήσεων’, Εκδόσεις Ευγ. Μπένου, Α’ Έκδοση 2010
- [16] ΛΑΓΗΕ Α.Ε., “Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ.” 2016
- [17] ΦΕΚ Αριθμού Φύλλου 85, Νόμος υπ’ αριθμόν 4254

